

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# **ANALÝZA TVORBY TŘÍSKY POMOCÍ DIGITÁLNÍ VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERY**

**ANALYSIS OF CHIP FORMING MECHANISM WITH A HIGH SPEED DIGITAL CAMERA**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. PETR KUBELA**

**VEDOUcí PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. ALEŠ POLZER, Ph.D.**

BRNO 2009



**ABSTRAKT**

V reálném životě často vyžadujeme sledování velmi rychlých dějů, které nejsou lidským okem pozorovatelné. Práce se zabývá možnostmi vysokorychlostních digitálních kamer, oblastí jejich aplikace v průmyslu a popisem mechanismu tvorby třísky. Praktická část je zaměřena na záznam vybraného procesu třískového obrábění a na problematiku nezbytně nutného osvětlení při procesu snímání objektu.

**Klíčová slova**

Vysokorychlostní digitální kamera, tvorba třísky, soustružení, metody osvětlení, světlo

**ABSTRACT**

In live we often involve monitoring of very fast actions, that are not observable by the human eye. The thesis focuses on possibilities of high speed digital cameras, their application in industry, and the mechanism of chip formation. The experiment part aims to record the chosen process of chip machining and the problems of necessary illumination during the process of object imaging.

**Key words**

High speed digital camera, chip formation, turning, methods of the illumination, light

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KUBELA, P. *Analýza tvorby třísky pomocí digitální vysokorychlostní kamery*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 66 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Analýza tvorby třísky pomocí digitální vysokorychlostní kamery* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

26.5.2009

.....

Bc. Petr Kubela

**Poděkování**

Děkuji tímto Ing. Aleši Polzerovi, Ph.D. a Ing. Janu Zouharovi za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

**OBSAH**

Abstrakt .....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování .....	6
Obsah .....	7
Úvod.....	8
1 VYSOKORYCHLOSTNÍ DIGITÁLNÍ VIDEOKAMERY.....	9
1.1 Co je to vysokorychlostní videozáznam.....	9
1.2 Kdo a proč používá vysokorychlostní digitální videokamery.....	9
1.3 Výběr vhodného typu a aplikace v průmyslu .....	10
1.4 Návratnost investic.....	12
1.5 Viditelné spektrum .....	13
1.6 Strojové vidění .....	14
2 FYZIKÁLNÍ PODSTATA PROCESU ŘEZÁNÍ .....	19
2.1 Geometrické charakteristiky.....	19
2.2 Smyková deformace ve střižné rovině.....	21
2.2.1 Určení úhlu střižné roviny podle koeficientu přechování třísky.....	23
2.2.2 Určení úhlu střižné roviny z podmínky minimální práce.....	24
2.3 Složky řezných rychlostí .....	25
3 OBRÁBĚNÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ .....	27
3.1 Základy procesu řezání .....	27
3.1.1 Mechanismus tvorby třísky .....	28
3.1.2 Průřez třísky.....	30
3.1.3 Přechování třísky .....	31
3.1.4 Základní tvary třísek .....	33
3.1.5 Řezné síly na nástroji .....	34
3.2 Faktory ovlivňující utváření třísky.....	36
3.2.1 Geometrie nástroje .....	36
3.2.2 Řezné podmínky .....	39
3.2.3 Utvářeče třísek .....	39
4 OBRÁBĚNÍ NEKOVOVÝCH MATERIÁLŮ .....	42
4.1 Obrábění konstrukčních keramik .....	42
4.2 Obrábění plastických materiálů .....	42
4.3 Obrábění dřeva .....	44
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	45
5.1 Plán experimentu.....	45
5.1.1 Příslušenství kamery .....	45
5.1.2 Objektivy .....	46
5.1.3 Externí přídavné světlo .....	47
5.1.4 Použitá zařízení .....	51
5.1.5 Popis experimentu.....	53
5.2 Vliv řezných podmínek na utváření třísky .....	54
5.2.1 Vliv hloubky řezu $a_p$ a velikosti posuvu $f$ .....	54
5.2.2 Vliv geometrie nástroje .....	56
5.3 Návrhy na řešení osvětlení .....	57
Závěr .....	61
Seznam použitých zdrojů .....	62
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	64
Seznam příloh .....	66

## ÚVOD

V praxi se zabýváme často procesy, které jsou velmi rychlé a okem nepozorovatelné. K měření takových procesů používáme vysokorychlostní videokamery, které umožňují snímat až 33 tisíc obrázků za sekundu. Při takové rychlosti vám může jen máloco uniknout. Díky těmto zařízením můžeme sledovat takové parametry a vlastnosti výrobků, které jsou jinými metodami velmi těžce měřitelné. Pomocí softwaru lze pak vysokorychlostní jevy velmi přesně analyzovat a kvantifikovat.

Vysokorychlostní kamery zachycují a ukládají digitální snímky do interní zabudované paměti, nebo stahují, např. přes rozhraní ethernet, do PC. Okamžitě po skončení děje je proto možné jej přehrávat libovolným směrem a ve volitelném zpomalení, nebo po jednotlivých snímcích. Některé kamery jsou vybaveny rozhraním CameraLink a umožňují přenos snímků v reálném čase. Délka takto pořízeného záznamu je omezena pouze kapacitou externího pevného disku (HDD). Kamery jsou vyráběny v provedení pro černobílý nebo barevný záznam. Systém výměnných objektivů se standardním závitem typu „C“ nebo „F“ umožňuje i případné připojení výkonného teleobjektivu nebo endoskopu a snímání extrémních dějů i z nepřístupných míst. Kamery jsou vybaveny i možností vzájemného propojení a synchronizace. Takto vytvořeným systémem kamer lze snímat děje z různých pohledů a nebo v mnohem větším prostoru. Vysokorychlostní kamera nám umožňuje mimo jiné provádět i bezdotykové monitorování výrobních procesů nebo chování produktů. Lze tak snadno odhalit riziko potenciální nefunkčnosti dílu ještě před zahájením jeho sériové výroby.

## 1 VYSOKORYCHLOSTNÍ DIGITÁLNÍ VIDEOKAMERY

Díky neustálému vývoji techniky, se nabízí mnoho možností využití maticových detektorů obrazu. Dosažitelná hustota snímacích bodů (pixelů) a rychlost odezvy umožňují konstruovat takové zobrazovací přístroje, které v minulosti mohli být jen pouhým přáním. Příkladem je vysokorychlostní digitální videokamera.



Obr. 1 Vysokorychlostní digitální videokamera TroubleShooter 1000 [4]

### 1.1 Co je to vysokorychlostní videozáznam

Vysokorychlostní videozáznam jako diagnostický nástroj pomáhá výzkumným pracovníkům i technikům v mnoha odvětvích průmyslu analyzovat děje probíhající v době řádově desítek milisekund. Pod pojmem vysokorychlostní si můžeme představit záznam sekvence snímků, zaznamenaných velmi vysokou záznamovou frekvencí. Tato sekvence nám umožňuje zobrazit, změřit a pochopit události, které se staly příliš rychle na to, aby je mohlo zachytit lidské oko.

Vysokorychlostní videozáznamy pořizujeme vysokorychlostními digitálními kamerami. Samotná kamera je poměrně jednoduchý přístroj nahrávající vysokou záznamovou frekvencí a zpětně zobrazující obrazy mnohem nižší přehrávací frekvencí. Na rozdíl od běžných videokamer, kde se záznamová frekvence pohybuje okolo 25Hz, pracuje vysokorychlostní videokamera běžně se záznamovou frekvencí až 1000Hz. Nejnovější vysokorychlostní kamery pak dosahují záznamové frekvence až 150 tisíc snímků za sekundu. Přehrávací frekvence je pak samozřejmě výrazně nižší a je volitelná podle potřeby. Díky výslednému zpomalení události je možné její průběh podrobně sledovat a zjistit, co se skutečně stalo.

### 1.2 Kdo a proč používá vysokorychlostní digitální videokamery

Při současném rychle se měnícím výrobním i výzkumném prostředí, je často nutné důkladné zanalyzování poměrně rychlých dějů. Záznam potřebný



k této analýze se nejsnáze a nejefektivněji pořídí právě vysokorychlostní digitální videokamerou.

Standardní videokamery mohou totiž zaznamenat pouze 25 snímků za sekundu a v konečném důsledku obvykle nepořídí záznam větší části rychlého děje. Při snímání vysokorychlostní digitální videokamerou, která zaznamenává stovky až tisíce snímků za sekundu, jde o něco naprosto jiného. Při následném pomalém přehrávání záznamu, popř. jeho prohlížení po jednotlivých snímcích, lze totiž postřehnout detaily, které by bez zpomalení děje zůstaly nepovšimnuty. Když se například podíváme v televizi na záznamy crashtestů automobilů demonstrující deformaci karoserie, účinnost bezpečnostních pásů či airbagů, je zřejmé, že analyzovat tyto děje pomocí běžných videokamer se záznamovou frekvencí 25Hz, by bylo velice obtížné, ne-li nemožné.

V oblasti průmyslu neříkáme, že jsou běžné videokamery zcela nepoužitelné, ale je ovšem třeba respektovat dosti striktně dané meze. Základním omezujícím faktorem jejich využití je, že standardní záznamová frekvence 25 Hz, je pro většinu pohybových problémů vyskytujících se ve strojích a mechanismech příliš nízká. Mnoho dějů probíhá během např. 100 ms, tj. za 1/10 sekundy. Standardní kamerou lze ovšem zaznamenat snímek pouze každých 40 ms. Z události trvající 100 ms tedy standardní videokamera poskytne uživateli asi 2,5 snímku. S vysokorychlostní kamerou zaznamenávající 1000 snímků za sekundu, bude uživatel schopen získat 100 snímků té stejné události. Výsledek je pak zřejmý při výsledné analýze záznamu. Při záznamu pohybu rychlostí 25 snímků za sekundu a jeho následném přehrávání desetkrát pomaleji, lze pozorovat jen 2,5 snímku za sekundu a výsledný obraz je pak velice „trhavý“ a tím pádem nevhodný k podrobné analýze[4].

Dalším důležitým činitelem je rychlost clony v kameře, která určuje dobu expozice snímku, pohybující se obvykle v setinách až tisícinách sekundy. Většina kamer má ve výbavě tzv. vysokorychlostní clony. Ty však umožní pořídít zase jen 25 snímků za sekundu.

### 1.3 Výběr vhodného typu a aplikace v průmyslu

Uvažujeme-li o použití vysokorychlostní digitální videokamery, měli by jsme nejprve odpovědět na základní otázky typu „Jak rychlou kameru potřebuji?“ a „Jak rychle je už příliš rychle?“. Dalším parametrem je rozlišení obrazu. Jestliže půjde o potřebu úložného prostoru, měla by být dána přednost co nejmenšímu rozlišení. Není-li však požadavek na úložný prostor kritický, lze použít rozlišení větší. Výsledkem však může být velké množství zbytečných dat. Přístup „čím víc, tím lépe“ zde není zrovna vždy na místě.

Jsou-li vybrány rychlost a rozlišení, dalším krokem je výběr vhodného rozhraní a poté nalezení konkrétního typu kamery. Kamera určená k využití v laboratoři s přímým připojením ke stolnímu počítači v reálném čase bude samozřejmě jiného typu, než kamera určená k použití ve výrobě, kde jsou hlavními požadavky jednoduchost obsluhy a mobilita.

**Aplikace v průmyslu**

Vysokorychlostní digitální videokamera je téměř univerzálním nástrojem k analýze rychlých pohybů v mnoha nejrůznějších aplikacích, např. při výzkumu, při vývoji nových výrobků, strojírenství, sledování stavu a údržbě strojů a mechanismů, v biomechanice atd.

Přestože každé využití vysokorychlostní kamery je svým způsobem jedinečné, lze zde vymezit tři hlavní oblasti:

- zkušebnictví
- věda a výzkum
- výroba

Tyto kategorie se mohou navzájem prolínat a zahrnují nespočet specifických aplikací.

V průmyslové výrobě se můžeme bavit např. o zachycení průběhu rychlého procesu na výrobní nebo balící lince či odhalení špatného seřízení stroje. To by bez použití vysokorychlostního záznamu bylo téměř nemožné. S vysokorychlostními videokamerami se lze proto stále častěji setkat např. na výrobních linkách a dopravnících v potravinářském, papírenském, textilním, hutním, či chemickém průmyslu, včetně linek vybavených roboty, ať už jsou použity kdekoliv. Vysokorychlostní kameru lze využít jak při vlastním seřizování daného stroje nebo zařízení, tak i k odhalení příčin zvýšené zmetkovitosti v důsledku jeho špatného seřízení. Pravidelnými kontrolami strojů a zařízení s využitím této videotechniky je navíc možné předcházet jejich poruchám a následnému přerušení výroby[5].

V oboru zkušebnictví pak lze zmínit např. zkoušky mechanických vlastností materiálů (odolnost proti nárazu a průrazu, průběh lomu, průběh tvorby třísky aj.) či odolnosti dílčích sestav nebo celých výrobků (působení vibrací, rázu, tlaku apod.), v leteckém a automobilovém průmyslu (car crash test).

Z oblasti výzkumu jsou to aplikace např. v biologii a biomechanice, při zkoumání spalovacích procesů, v oboru dynamiky kapalin či v experimentální aerodynamice. Dále jsou to např. balistické testy, včetně testů výbušnin a posuzování zásadně důležitých bezpečnostních komponent[5].

**Základní typy vysokorychlostních kamer**

- kompaktní sestava – displej je integrovanou částí kamery (TroubleShooter)
- samostatná kamera – možnost připojení periferních zařízení (i-SPEED)

Firma OLYMPUS se zabývá vývojem a výrobou vysokorychlostních digitálních videokamer. První z kamer byl typ i-SPEED 1GB, která byla navržena pro aplikace kde je požadováno snadno a rychle pořídit záznam.

Druhým typem je i-SPEED 2, kamera nabízející flexibilitu, přesnost a rozšiřující záznam videa o širokou škálu dalších možností. Dále nabízejí analýzu obrazu a rychlé stahování dat pomocí jednoduchého ovládání. Maximální rychlost snímání je 33 tisíc snímků za sekundu, při maximálním rozlišení 800x600 pixelů jsme schopni zaznamenávat „pouze“ 1000 snímků za sekundu[26].

Existují různé typy konfigurací kamer i-SPEED. K samostatné kameře můžeme např. připojit jednotku CDU (*Controller Display Unit*), která obsahuje LCD obrazovku s vysokým rozlišením. Můžeme také připojit přídavnou obrazovku, nebo PC. Jednotka CDU obsahuje uživatelské menu sloužící ke kompletnímu ovládání kamery. Přes rozhraní Ethernet můžeme ovládat až 250 vysokorychlostních kamer umístěných v síti pod vlastními IP čísly.

Posledním přírůstkem do této řady vysokorychlostních kamer je i-SPEED 3 (obr.2). Tato kamera byla navržena tak aby vyhovovala specifikacím poskytující vysoké rozlišení, extrémní světelnou citlivost a záznam až do 150 000 snímků za sekundu. Při maximálním rozlišení 1280x1024 pixelů je snímkovací rychlost nahrávání 2000 snímků za sekundu. Vytváří ideální nástroj pro nejvyšší úroveň výzkumu[26].



Obr. 2 Vysokorychlostní kamera i-SPEED 3 [26]

## 1.4 Návratnost investic

Kalkulace návratnosti investic jednoduše představuje dobu, za kterou se nám vrátí peníze investované do nákupu vysokorychlostní kamery.

Kolik sem utratil

÷

Kolik ušetřím za rok

= XX roků

Tento vztah dává smysl, ale jakou částku skutečně ušetříme za rok? Existuje několik faktorů, které budou mít vliv na konkrétní případ. Pro většinu montážních linek jsou považovány za dva největší faktory procentuální zvýšení výrobní kapacity a procentuální úbyt zmetkovosti[11].

### Zvýšení výrobní kapacity

Pokud snížíme časové prodlevy mezi všemi jednotlivými operacemi, dojde ke zrychlení výrobní linky a tím ke zvýšení výrobní kapacity.

Tab. 1 Zvýšení výrobní kapacity [11]

Zvýšení výrobní kapacity	Celkové roční výnosy za vyrobené produkty (v tis. Kč)				
	5,000	10,000	15,000	20,000	25,000
1%	50	100	150	200	250
2%	100	200	300	400	500
3%	150	300	450	600	750
4%	200	400	600	800	1,000
5%	250	500	750	1,000	1,250
	Oblast prezentující potenciální roční zvýšení výnosů z výroby (v tis. Kč)				

### Úbyt zmetkovitosti

Snížení procenta odpadů je pozitivní pro životní prostředí a stejně tak je důležitým faktorem snižujícím náklady na materiál. Když se výrobní proces zastaví právě kvůli zmetkové součásti, dochází k dalším časovým prodlevám a výdajům za opravy.

Tab. 2 Snížení procenta odpadu [11]

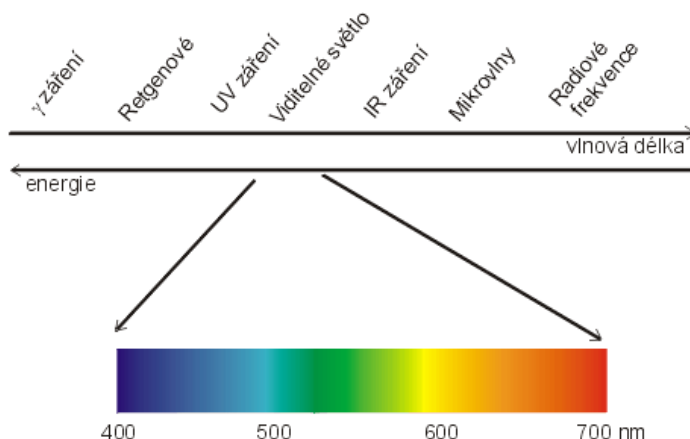
Snížení odpadu	Roční průměrné náklady na materiál (v tis. Kč)				
	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000
1%	10	20	30	40	50
2%	20	40	60	80	100
3%	30	60	90	120	150
4%	40	80	120	160	200
5%	50	100	150	200	250
	Oblast prezentující potenciální roční úspory nákladů na materiál (v tis. Kč)				

## 1.5 Viditelné spektrum

Základní charakteristikou elektromagnetického vlnění je tzv. vlnová délka, kterou označujeme  $\lambda$  (lambda) a je měřená ve vhodných délkových jednotkách. Jednoduše řečeno, vlnová délka nám říká, jak „dlouhá je vzdálenost mezi dvěma hřbety vln“. Analogickou veličinou je frekvence, která nám říká, kolikrát vlna kmitne za 1 sekundu.

Roztřídíme-li si vlnové délky záření vydávaného určitým zdrojem a zjistíme-li si intenzity záření na těchto jednotlivých vlnových délkách, dostaneme tzv. spektrum. Na obr.3 je schematicky naznačen obor vlnových délek celého elektromagnetického spektra – od nejkratší po ty nejdelší. Úzkou oblast mezi 400 až 700 nm můžeme vnímat zrakem a tento obor

elektromagnetického záření nazýváme viditelné spektrum (světlo). Právě tato oblast elektromagnetického záření je pro experiment směrodatná[7].



Obr. 3 Viditelné spektrum [7]

Elektromagnetického záření je množství druhů a používá se k nejrůznějším účelům. Základní rozčlenění je na rádiové vlny, tepelné záření a rentgenové záření. Elektromagnetické záření se může pohybovat nejvyšší známou rychlostí vůbec – rychlostí světla (299 792 458 m/s). Této rychlosti dosahuje v případě, kdy není brzděno odporem prostředí, ve vakuu. Jediné, čím se od sebe druhy elektromagnetického záření liší, je množství přenesené energie. Nejméně energie přenášejí rádiové vlny, nejvíce paprsky gama nebo kosmické záření. Všeobecně platí, že čím více energie záření obsahuje, tím je životu nebezpečnější.

## 1.6 Strojové vidění

Osvětlovací soustava je stejně důležitou částí systému strojového vidění jako kamera. Pomocí osvětlení může být dosaženo podstatně kvalitnějších výsledků záznamu. Účelem osvětlení je dosáhnout maximálního kontrastu těch částí objektu, které nás zajímají, oproti částem, které nejsou předmětem inspekce (rušivé části). Obecně platí, že kontrast zájmové a rušivé části objektu lze vytvářet v zásadě dvojím způsobem a sice, využitím jejich rozdílné absorpce nebo rozdílu jejich jasu, který vznikne vhodným směrovým osvětlením. Návrh optimální osvětlovací soustavy začíná analýzou interakce objektu a světla. Na základě výsledků této analýzy je možné stanovit, jak a čím objekt osvětlit a jak eliminovat případné rušivé vlivy. Postup analýzy můžeme shrnout do následujících bodů[24]:

- analýza vlastností snímaného objektu vzhledem k úloze strojového vidění
- analýza potřebných vlastností použitého světla
- stanovení vhodné geometrie osvětlení
- výběr vhodného osvětlovače
- eliminace rušivých vlivů

### **Analýza vlastností snímaného objektu**

Analýza se zaměřuje zejména na tyto části snímaného objektu

- velikost absorpce nebo odrazivosti světla, která určuje odrazy a lesky
- členitost objektu (výstupky, otvory atd.)
- tvar a velikost objektu pro určení velikosti a vzdálenosti osvětlovače
- pozadí objektu, které může působit rušivě
- změna polohy nebo případný pohyb objektu

### **Stanovení potřebných vlastností použitého světla**

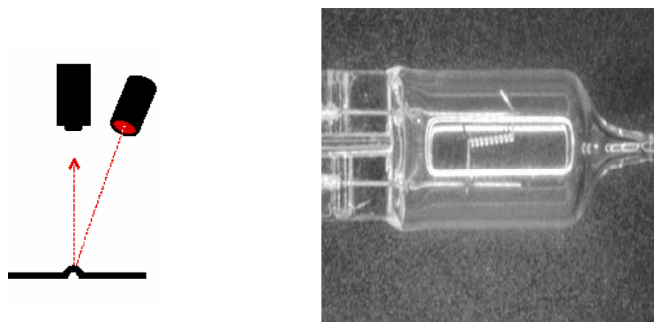
Ke stanovení potřebných vlastností světla je třeba analyzovat, jak se bude použité světlo chovat v interakci se snímaným objektem a jak bude následně působit na snímač obrazu kamery. Světlo dopadající z osvětlovače na sledovaný objekt se podle zákonů optiky rozdělí: část se ho odrazí, část způsobí v materiálu objektu emisi sekundárního záření a část se absorbuje.

### **Stanovení vhodné geometrie osvětlení**

Geometrie osvětlení je dána i složením svazku světla. Paprsky ve svazku mohou být rovnoběžné, v tom případě jde o světlo s rovnoběžnými paprsky, nebo difuzní, tzn. že plně rozptýlené světlo má paprsky rovnoměrně rozložené ve všech směrech. Svazek světla reálného osvětlovače leží mezi těmito dvěma extrémy. Obecně platí, že světlo rozptýlené zmenšuje kontrasty způsobené členitostí objektu a strukturou povrchu a zvýrazňuje kontrasty způsobené absorpcí. V opačném případě, chceme-li zobrazit kontrastně členění objektu, zvolíme světlo směřované.

#### *a) přední osvětlení*

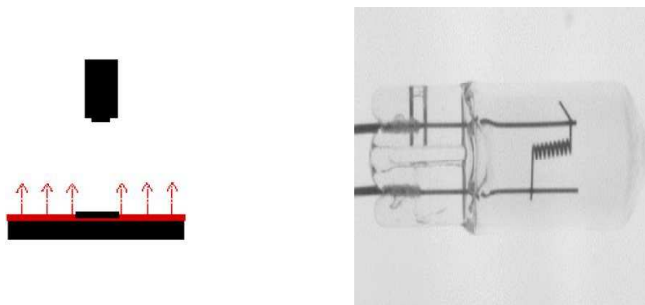
Jedná se o nejsnáze pochopitelný způsob osvětlení objektu. Objekt je osvětlen tak, že světlo od něj odražené dopadá přes objektiv na obrazový snímač.



Obr. 4 Přední (přímé) osvětlení [24]

**b) zadní osvětlení**

Používá se k zobrazení obrysu objektu, typické pro úlohy měření rozměrů. Tento typ osvětlení je nutný, jestliže má být vytvořen kontrastní obrys objektu za průhlednou překážkou.



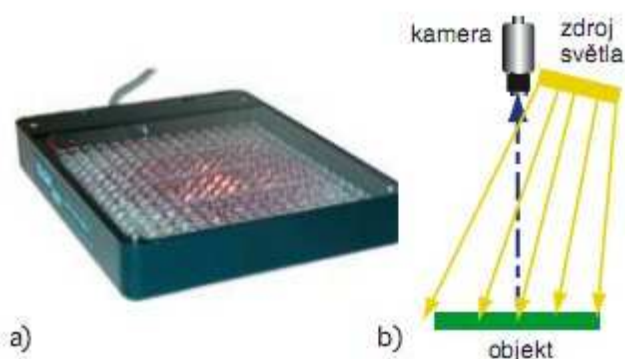
Obr. 5 Zadní osvětlení [24]

**Výběr vhodného typu osvětlovače**

V současnosti existuje velký výběr druhů osvětlovačů. V poslední době se nejvíce používají osvětlovače s LED diodami. LED diody nepotřebují vysoké napětí a jejich světelný tok se dá snadno regulovat. Předností je také jejich dlouhá životnost. Osvětlovače se dodávají v různých velikostech, s různou barvou světla a různým způsobem řízení. Základní druhy těchto osvětlovačů jsou tyto:

**a) plošné osvětlovací pole**

Poskytuje směrované světlo. Rozptýlení světla je dáno vyzařovacím úhlem LED diod. V nenáročných úlohách mohou nahradit i nákladnější osvětlovače s jasným obrazovým polem a rozptýleným světlem. Malá a speciální pole se používají i jako pomocná světla nebo jako zdroje pro složitější osvětlovací soustavy.

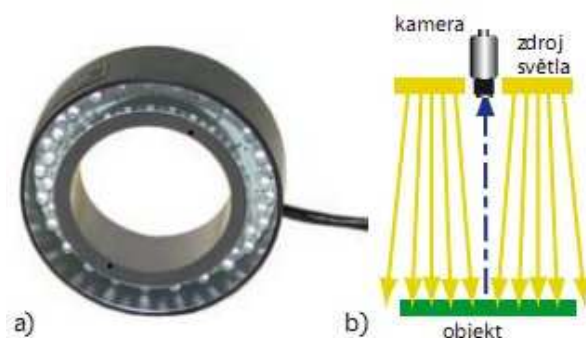


Obr. 6 Plošné osvětlovací pole – a) osvětlovač, b) schéma [24]



### b) kruhový osvětlovač

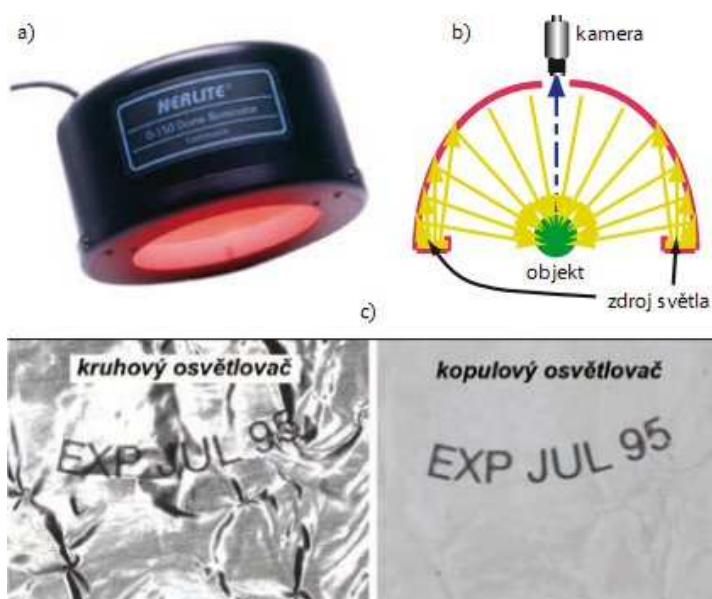
Poskytuje více rozptýlené světlo směřující od objektu kamery. Tento osvětlovač nemá přímo ideální vlastnosti, zvláště v provedení jednoduchého kruhu.



Obr. 7 Kruhový osvětlovač – a) osvětlovač, b) schéma [24]

### c) kopulový osvětlovač

Kopulové osvětlovače se používají pro osvětlení s jasným obrazovým polem kdy je nezbytně nutné osvětlit objekt světlem rozptýleným. Např. pokud potřebujeme přečíst nápis na zmačkané lesklé fólii. Rozptýlené světlo se vytváří difuzním odrazem na vnitřní ploše polokoule. Někdy tento způsob osvětlení nazýváme „bezestínový“.

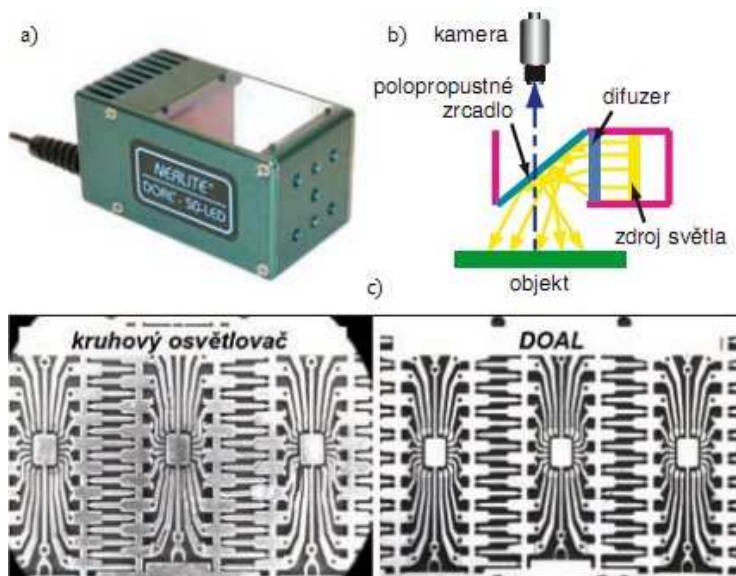


Obr. 8 Kruhový osvětlovač – a) osvětlovač, b) schéma, c) příklad zobrazení [24]



#### d) osvětlovač DOAL

Specifické osvětlení s jasným obrazovým polem a rozptýleným světlem poskytuje právě tento osvětlovač. Použitý difuzor zajišťuje lepší rozptýlení světla. Díky konstrukci s polopropustným zrcadlem dopadá rovnoměrně z celé plochy nad objektem. Nevýhodou je vyšší cena.



Obr. 9 Osvětlovač DOAL–a) osvětlovač, b) schéma, c) příklad zobrazení [24]

#### Eliminace rušivých vlivů

Snadné by bylo, kdybychom mohli jako jediný zdroj světla stále používat jeden osvětlovač. Docílili bychom tak stále stejného jasového obrazu a výsledky by pak byly opakovatelné. V praxi je to však nereálné. Existují vždy další zdroje světla, jako je denní světlo, umělé osvětlení provozu aj. Např. denní světlo je pak hodně nevyzpytatelné, protože záleží na aktuálním počasí a hodině.

Nejjednodušším řešením je tyto nežádoucí zdroje světla odstínit tak, že vytvoříme pomocí osvětlovačů řádově vyšší osvětlení, než které vytváří nežádoucí zdroje. V takovém případě potřebujeme většinou vysoký světelný tok, což vyžaduje i velké množství energie a proto zapínáme osvětlovač pouze v době snímání.

V praxi obecně potřebujeme pro úspěšnou integraci strojního vidění do cyklu výrobní operace přezkoumat splnění hlavních podmínek:

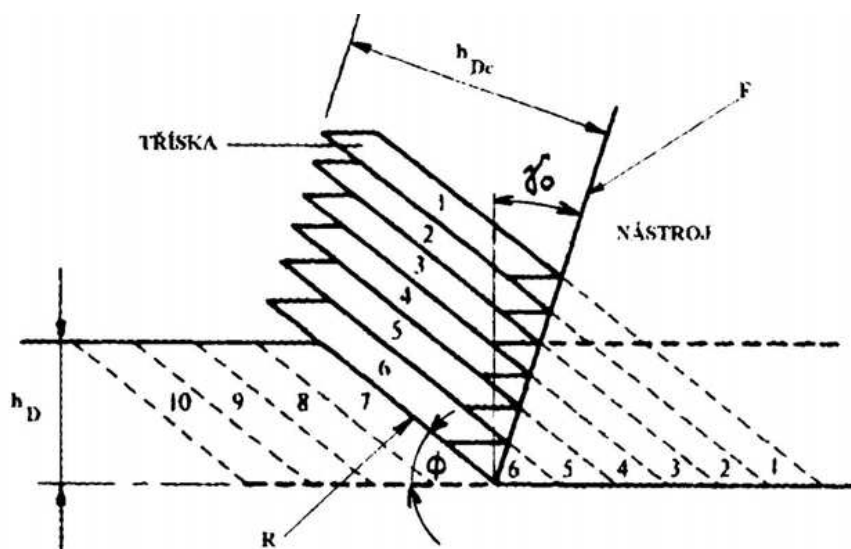
- vhodné prostorové uspořádání výrobního zařízení, které umožní nasvítit a sejmut obraz objektu
- vhodné časové uspořádání operačního cyklu, které poskytne potřebnou dobu na sejmoutí a vyhodnocení snímku i následnou akci
- vhodné uspořádání výrobního zařízení, které zajišťuje např. zastavení operace při zjištění chyby v přípravě či vyřazení dílu

## 2 FYZIKÁLNÍ MODEL PROCESU ŘEZÁNÍ

Proces řezání je procesem intenzivní plastické deformace podél roviny maximálních smykových napětí – smykové roviny. Materiál se nezačne měnit v třísku dokud nepřekročí tuto smykovou rovinu. Pro vysvětlení procesu řezání jako procesu plošné plastické deformace se využívá systému pravoúhlého řezání. Předpoklady modelu pravoúhlého řezání jsou [16]:

- dokonale ostrý nástroj
- úhel hřbetu, kde nedochází ke styku nástroje a obrobku
- smyková rovina se šíří dopředu od břitu nástroje
- ostří nástroje je kolmé ke směru hlavního pohybu
- hloubka řezu je konstantní
- šířka nástroje je větší než šířka obrobku
- rychlost řezání je konstantní a tvoří se plynulá tříska

Jednoduchý model řezání sestavil PIISPANEN (1937) a představuje řezání jako posouvání vrstev materiálu při pohybu nástroje do řezu. Tyto vrstvy se oddělují pod úhlem  $\Phi$ , obr. 10 [16].



Obr. 10 Model řezání Piispänen (1937) [16]

Model skluzové deformace, způsobené posunováním „lamel“ můžeme ve skutečnosti vidět pod mikroskopem na vybroušeném a naleštěném vzorku třísky.

### 2.1 Geometrické charakteristiky

Při určení sestavení geometrických charakteristik v jedné smykové rovině vycházíme ze zjednodušených předpokladů:

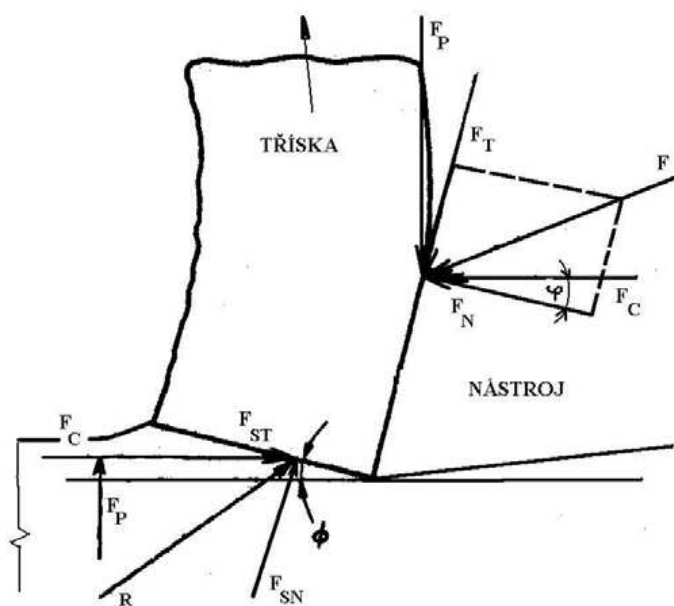
- břit nástroje a jeho řezný klín je ideálně ostrý
- elementy třísky se vytváří ve vrstvách rovnoběžných se smykovou rovinou
- materiál obrobku je izotropní a je bez poruch
- neuvažujeme účinek tepla díky plastické deformaci a tření

V nejjednodušším případě můžeme uvažovat pouze dvě síly. Mezi čelem nástroje a třískou působí síla  $\mathbf{F}$  a síla  $\mathbf{R}$  působící v rovině maximálních smykových napětí, tj. mezi obrobkem a třískou.

$$\mathbf{F} = -\mathbf{R} \quad (2.1)$$

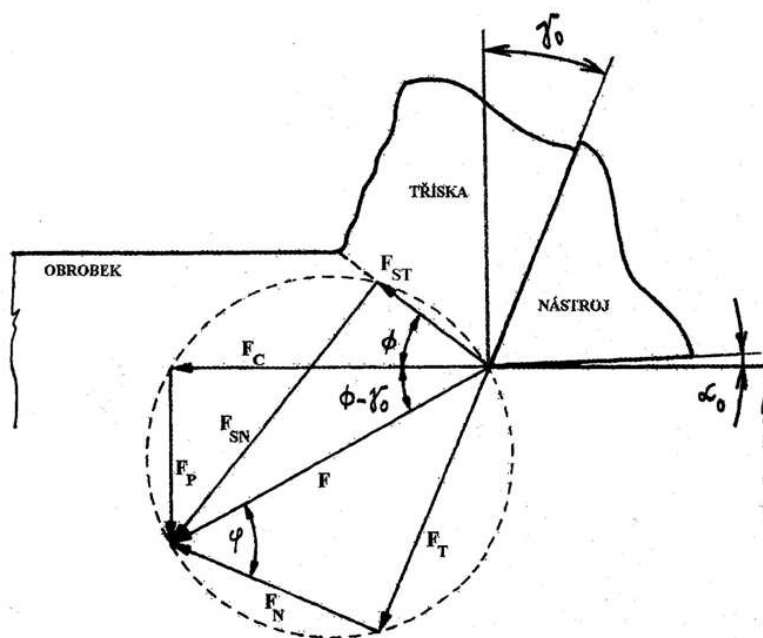
Síly  $\mathbf{F}$  a  $\mathbf{R}$  dále rozkládáme na jednotlivé složky (obr. 11).

- řezné složky – vertikální  $F_P$  a horizontální  $F_C$
- složky na čele nástroje – tečná  $F_T$  a normálová  $F_N$
- složky v rovině max. smykových napětí – tečná  $F_{ST}$  a normálová  $F_{SN}$



Obr. 11 Síly na třísce [16]

Merchant sestavil v roce 1945 diagram řezných sil pro ortogonální řezání, kde všechny složky jsou vyneseny v místě špičky nástroje (obr. 12).



Obr. 12 Rozložení řezných sil dle Merchanta [16]

Pomocí horizontální složky  $F_C$  a vertikální složky  $F_P$ , které změříme dynamometrem, jsme schopni vypočítat všechny složky řezné síly pomocí následujících vztahů:

$$F_{ST} = F_C \cdot \cos \phi - F_P \cdot \sin \phi \quad (2.2)$$

$$F_{SN} = F_C \cdot \sin \phi + F_P \cdot \cos \phi = F_{ST} \cdot \tan(\phi + \phi - \gamma_0) \quad (2.3)$$

$$F_T = F_P \cdot \sin \gamma_0 + F_C \cdot \cos \gamma_0 \quad (2.4)$$

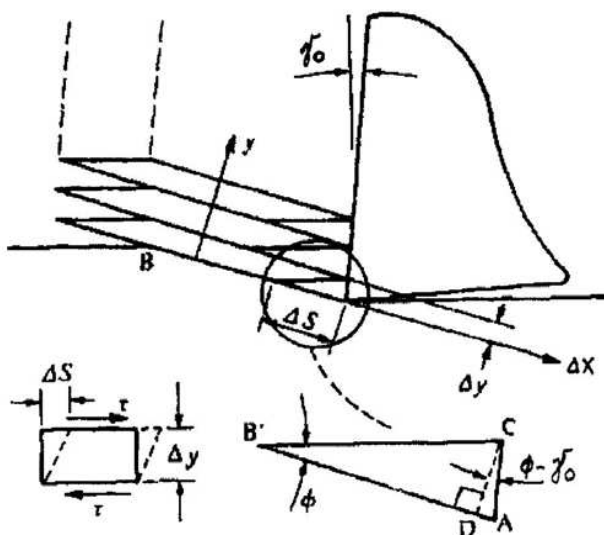
$$F_N = F_P \cos \gamma_0 - F_C \cdot \sin \gamma_0 \quad (2.5)$$

## 2.2 Smyková deformace ve střižné rovině

Jednoduchý model průběhu plastické deformace ukazuje obr. 13. V tomto modelu spočívá tvorba třísky v deformaci a posouvání dílčích vrstev materiálu při pohybu nástroje do řezu, přičemž tyto vrstvy se oddělují v rovině skloněné pod úhlem  $\Phi$ . Deformace obráběného materiálu třísky na čele nástroje se přenáší na volný povrch třísky a tvoří se nové povrchy. Tříska je ve skutečnosti na čele nástroje převážně v plošném kontaktu. Smyková deformace se od čistého smyku liší tím, že předpokládá působení složeného namáhání – smykových složek a normálních složek[18].

Stanovení smykové deformace vychází z poměrného posunutí, které je definováno vztahem:

$$\gamma = \frac{\Delta s}{\Delta y} = \frac{AB'}{CD} \quad (2.6)$$



Obr. 13 Model řezání pro výpočet smykové deformace [16]

Pokud budeme uvažovat

$$\Delta s = AD + DB', \quad (2.7)$$

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{CD}{DB'} \Rightarrow DB' = \frac{CD}{\operatorname{tg} \phi}, \quad (2.8)$$

$$\operatorname{tg}(\phi - \gamma_0) = \frac{AD}{CD} \Rightarrow AD = CD \cdot \operatorname{tg}(\phi - \gamma_0), \quad (2.9)$$

a dosadíme

$$\Delta s = \frac{CD}{\operatorname{tg} \phi} + CD \cdot \operatorname{tg}(\phi - \gamma_0) = CD \cdot \left( \frac{1}{\operatorname{tg} \phi} + \operatorname{tg}(\phi - \gamma_0) \right), \quad (2.10)$$

dostaneme vztah pro smykovou deformaci

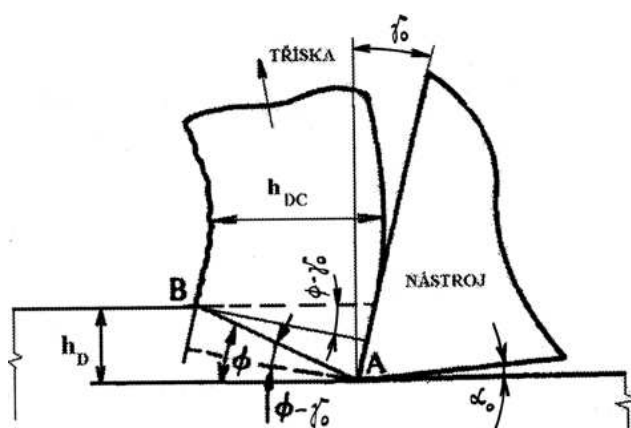
$$\gamma = \frac{\Delta s}{\Delta y} = \frac{1}{\operatorname{tg} \phi} + \operatorname{tg}(\phi - \gamma_0). \quad (2.11)$$

### 2.2.1 Určení roviny maximálních smykových napětí z hodnoty koeficientu přechování třísky

Vycházíme ze zákona stálosti objemu – objem obráběného materiálu  $V_m$  je stále stejný jako objem odebraného materiálu  $V_{ch}$ , a z těchto podmínek:

$$h_{DC} \geq h_D. \quad (2.12)$$

$$b_D = b_{DC}. \quad (2.13)$$



Obr. 14 Schéma pro odvození vztahu mezi úhlem  $\Phi$  a součinitelem přechování třísky [16]

Vztah pro součinitel přechování třísky:

$$k_h = \frac{h_{DC}}{h_D} \quad (2.14)$$

Pokud platí

$$b_{DC} = b_D, \quad (2.15)$$

pak

$$V_m = h_D \cdot b_D \cdot L, \quad (2.16)$$

$$V_{ch} = h_{DC} \cdot b_{DC} \cdot L_C. \quad (2.17)$$

Dle zákona stálosti objemu

$$h_D \cdot b_D \cdot L = h_{DC} \cdot b_{DC} \cdot L_C \Rightarrow \frac{L}{L_C} = \frac{h_{DC}}{h_D}. \quad (2.18)$$

Po dosazení podle obr. 14

$$k_h = \frac{h_{DC}}{h_D} = \frac{AB \cdot \cos(\phi - \gamma_0)}{AB \cdot \sin \phi}, \quad (2.19)$$

dostaneme po upravení konečný vztah

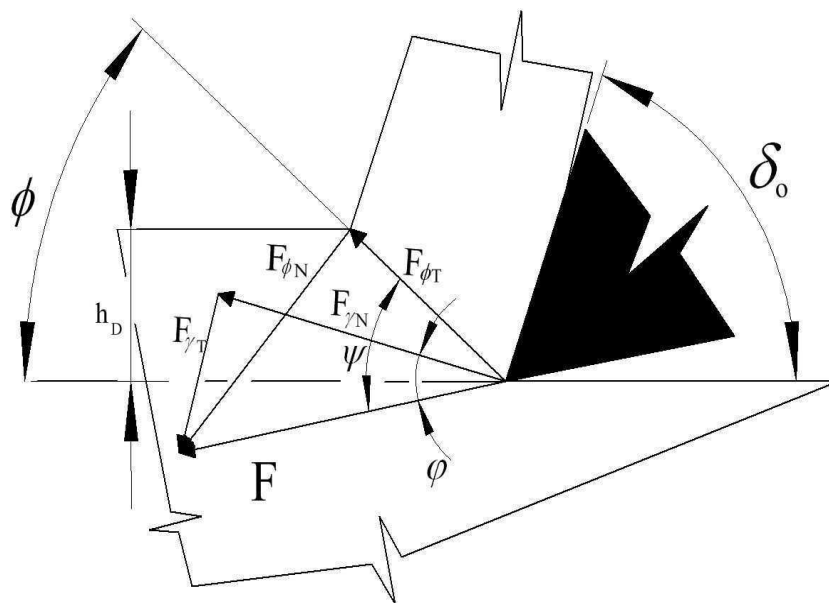
$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\cos \gamma_0}{1 - \sin \gamma_0}. \quad (2.20)$$

### 2.2.2 Určení roviny maximálních smykových napětí z podmínky minimální vynaložené práce

Vycházíme z podmínky z rovnice minimální deformační práce:

$$E_D = F_S \cdot l \quad (2.21)$$

Při hledání minima je dráha  $l$  považována za konstantní a proto je posuzován vliv síly.



Obr. 15 Schéma pro odvození vztahu mezi úhlem  $\Phi$  a podmínky minimální práce [14]

Z obr. 15 plyne:

$$\cos \psi = \frac{F_{\phi T}}{F}. \quad (2.22)$$

Z podmínky smykového napětí ve střížné rovině

$$\tau_s = \frac{F_{\phi T}}{A_s} = \frac{F_{\phi T} \cdot \sin \phi}{b_D \cdot h_D}, \quad (2.23)$$

odvodíme vztah pro výpočet síly  $F$

$$F = \frac{\tau \cdot h_D \cdot b_D \cdot \frac{1}{\sin \phi}}{\cos \psi}. \quad (2.24)$$

Následnou úpravou se

$$F = \tau \cdot h_D \cdot b_D \frac{1}{\sin \phi \cdot \sin(\phi + \phi + \delta_0)}. \quad (2.25)$$

Dle podmínky minimální práce

$$\frac{\partial F}{\partial \phi} = 0, \quad (2.26)$$

odvozením a následnou úpravou dostaneme konečný vztah pro výpočet úhlu roviny max. smykových napětí

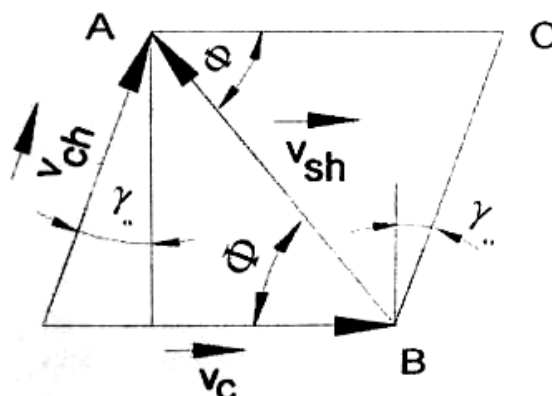
$$\phi = 90^\circ - \frac{\varphi + \delta_0}{2}. \quad (2.27)$$

### 2.3 Rychlost smykové deformace

Složky rychlostí ve střížné rovině hrají významnou roli během procesu řezání. Jednotlivé složky jsou následující:

- řezná rychlost  $v_c$
- rychlost odcházející třísky  $v_{ch}$
- rychlost v rovině maximálních smykových napětí  $v_{sh}$ , tj. relativní rychlost třísky vzhledem k obrobku v této rovině

Řezná rychlost je relativní rychlostí nástroje vzhledem k obrobku a rychlost odcházející třísky je relativní rychlostí třísky vzhledem k čelu nástroje. Velikost jednotlivých složek vypočítáme z geometrických závislostí uvedených na obr. 16.



Obr. 16 Složky vektorových rychlostí v kořenu třísky [18]

Rychlost stříhové deformace definujeme jako:

$$\dot{\gamma} = \frac{\gamma}{t_{def}}. \quad (2.28)$$

kde:  $t_{def}$  – čas deformace

Čas deformace vypočítáme pomocí geometrických závislostí na obr. 16.

$$t_{def} = \frac{BC}{v_{ch}} = \frac{\Delta y}{v_{ch} \cdot \cos(\phi - \gamma_0)}. \quad (2.29)$$

Sinova věta nám udává následující vztahy:

$$\frac{v_{sh}}{\sin(90 - \gamma_0)} = \frac{v_c}{\sin(\gamma_0 + 90 - \gamma_0)}, \quad (2.30)$$

$$\frac{v_{ch}}{\sin \phi} = \frac{v_c}{\sin(\gamma_0 + 90 - \gamma_0)} \quad (2.31)$$



po úpravě dostaneme

$$v_{sh} = \frac{\cos \gamma_0}{\cos(\phi - \gamma_0)} \cdot v_c. \quad (2.32)$$

$$v_{ch} = \frac{\sin \phi}{\sin(90 - \phi + \gamma_0)} \cdot v_c. \quad (2.33)$$

Dosazením do vztahu 2.30 a 2.31 a následnou úpravou dostaneme konečný vztah pro výpočet rychlosti smykové deformace:

$$\dot{\gamma} = \frac{\cos \gamma_0}{\cos(\phi - \gamma_0)} \cdot \frac{v_c}{\Delta y}. \quad (2.34)$$

Rychlost smykové deformace můžeme také spočítat pomocí zjednodušeného vztahu

$$\dot{\gamma} = \frac{\Delta s}{\Delta y \cdot \Delta t} = \frac{v_s}{\Delta y}. \quad (2.35)$$

kde:  $\Delta t$  – čas během pohybu materiálu po vzdálenosti  $\Delta s$   
 $\Delta y$  – tloušťka lamel smykového pásma

### 3 OBRÁBĚNÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ

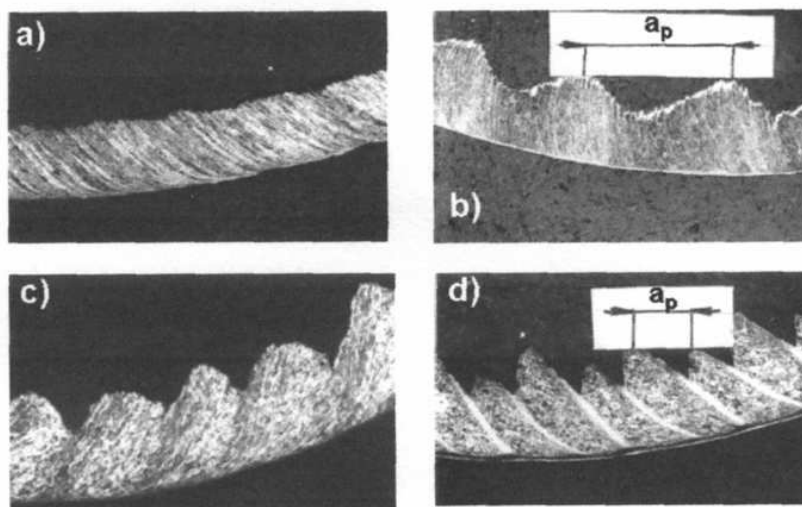
Kovové materiály se všeobecně obtížně obrábějí – některé jsou obrobitelné lépe, jiné jsou obrobitelné hůře. Převážnou většinu materiálů obrobků však v současné době lze obrábět různými způsoby a za všech možných pracovních podmínek bez větších obtíží. Technologie obrábění se v dnešní době vyvinula ve „vědu“ kde pečlivě konstruované břity a každému danému způsobu obrábění přizpůsobené řezné materiály zaručují rovněž předem přesně vypočítané výsledky[1].

#### 3.1 Základy procesu řezání

Problémy obrábění se v dnešní době zredukovaly téměř výhradně na utváření třísky. I když v první řadě jde o dosažení čisté obrobené plochy a přesných rozměrů, hraje otázka definovaného tvaru třísky zvlášť významnou roli. Obrábění je tedy záležitostí kontrolovaného odchodu třísky a v případě nutnosti lámání třísky[1]. Při procesu obrábění vzniká velké množství tepla a je třeba kontrolovaně odvádět třísku z řezné zóny právě z důvodu odvodu tepla. U klasického postupu obrábění kovového materiálu jedním břitem přetváří nástroj část materiálu obrobku a odděluje jej v podobě třísky.

Základním nástrojem pro řezání je klín, který je tvořen plochou čela a plochou hřbetu. Řada informací o procesu řezání vycházelo i z praktických zkušeností a pozorování. Jedná se o tyto skutečnosti[16]:

- rozdílné podmínky dané druhem řezaného materiálu
- různé způsoby tvoření a odcházení třísky z místa řezání, závislé na geometrických vlastnostech nástroje
- uspořádání třísky na její zadní straně svědčí o tom, že řezání představuje smykový mechanismus
- tvary třísek se mění od třísky plynulé, přes třísku zvlněnou, článkovitou až k třísce segmentované, obr. 17
- nástroj, tříska a obrobek jsou ohřáty na teplotu vyvolanou procesem řezání



Obr. 17 Tvary třísek [16]

a) plynulá, b) vlnitá, c) elementární, d) segmentovaná

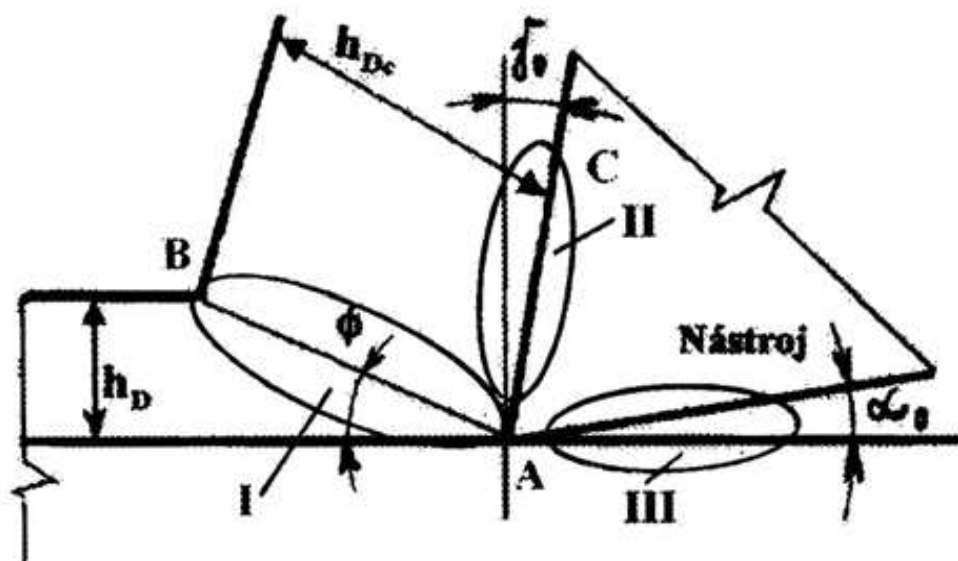
### 3.1.1 Mechanismus tvorby třísky

Oddělování třísky je velmi složitým procesem, jehož průběh závisí na mnoha činitelích, zejména na fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu a jejich závislosti na podmínkách plastické deformace. Pro proces obrábění jsou platné následující zákony:

- zákon stálosti objemu – před a po obrábění je objem stále stejný
- zákon nejmenšího odporu – částice kovu se během procesu pohybuje ve směru nejmenšího odporu
- zákon maximálního smykového napětí – deformace nastane teprve tehdy až smykové napětí v deformované oblasti dosáhne kritické hodnoty.

Při procesu řezání, který je provázen plastickou deformací, dochází k deformacím ve třech oblastech:

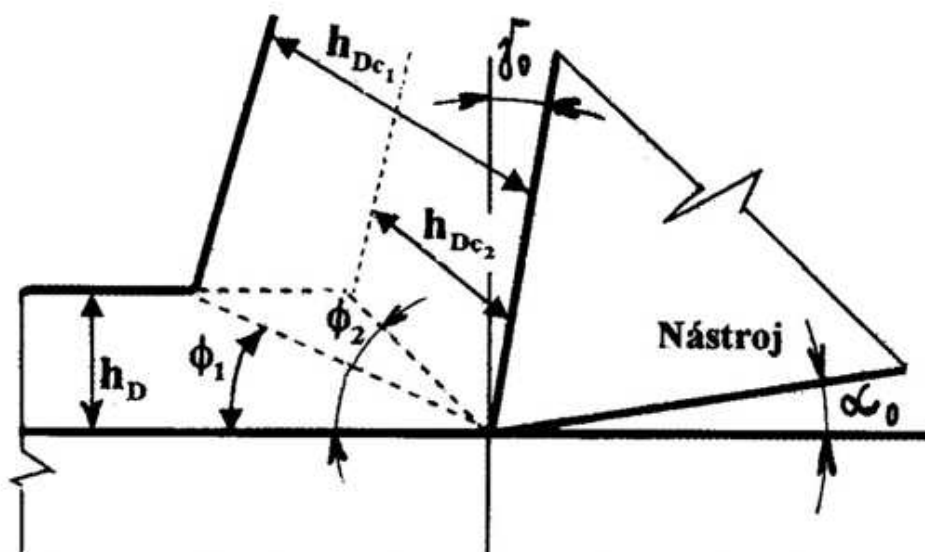
- primární plastická deformace – oblast I
- sekundární plastická deformace – povrchová vrstva mezi třískou a čelem nástroje, oblast II
- deformace v povrchové vrstvě obrobené plochy přilehlé k hřbetu nástroje, oblast III



Obr. 18 Mechanismus utváření třísky [16]

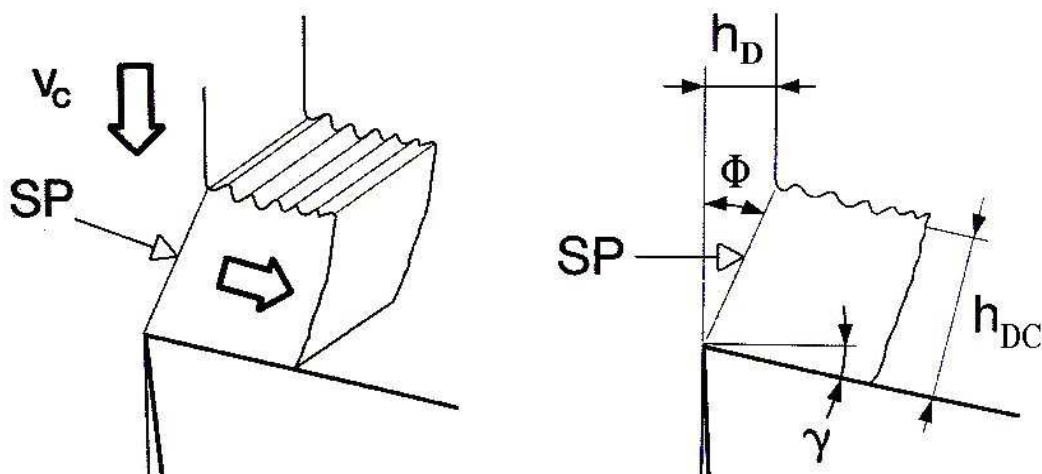
Velikost oblasti I souvisí s řeznou rychlostí, přičemž platí, že se zvyšující se řeznou rychlostí se zužuje oblast I. Dále platí, že při zvyšování řezné rychlosti se zvětšují úhly střížné roviny  $\Phi$  (obr. 19) s tím, že úhel počátku plastické deformace roste rychleji až dojde k jejich splnutí a ke vzniku třísky dochází plastickým skluzem v jediné rovině, v rovině maximálních smykových napětí, tzv. rovině stříhu (SP) (obr. 20).

Úhel  $\Phi$  je úhel střížné roviny, přičemž  $\Phi_0$  značí počátek plastické deformace a  $\Phi$  pak konec plastické deformace.



Obr. 19 Vliv úhlu  $\Phi$  na délku roviny maximálních smykových napětí a na tloušťku třísky [16]

V okamžiku kdy dojde k překročení meze kluzu materiálu obrobku, nastanou pružné a plastické deformace. Materiál vpravo od roviny stříhu je již tvářenou třískou s tloušťkou  $h_{DC}$ , zatímco tloušťku vrstvy odřezávaného materiálu vlevo označuje  $h_D$  [1]. Část odřezávaného materiálu, který je za rovinou stříhu a „klouže“ po čele nástroje je podrobena tzv. sekundární plastické deformaci. Na nástroj se postupně navažuje část třísky a vytváří tzv. „nárůstek“. Nárůstek přebírá funkci břitu, a tím značně ovlivňuje podmínky řezu, což se projeví na změně geometrie břitu (zvětšuje se poloměr ostří, zmenšuje se úhel řezu aj.). Je důležité aby nárůstky na čele nástroje byly co možná nejmenší. Při úhlu řezu menší než  $50^\circ$  se nárůstky nevytváří a při vysokých řezných rychlostech se snižuje možnost tvorby nárůstku a to vlivem snížení napětí mezi třískou a břitem nástroje. Nárůstky se v určité chvíli odlomí a celý proces vzniku se opakuje. Vlastní obrábění probíhá v rovině stříhu která je v převážné míře určována poměrem mezi tloušťkou vrstvy odřezávaného materiálu a tloušťkou tvářené třísky.



Obr. 20 Střížná rovina utváření třísky [1]

Tvar třísky je ovlivňován převážně materiálem obrobku. Šířka pásma sahá od nejrůznějších plynulých tvarů až po třísku drobivou. Když porovnáme různé mechanické vlastnosti mezi střední uhlíkovou ocelí (nelegovanou ocelí) a ocelí legovanou, můžeme říci, že nelegovaná ocel se utváří mnohem snadněji a to na základě nižší pevnosti, která se deformací dokonce ještě sníží. Tříska utvářená při obrábění nelegované oceli má tak větší počáteční zakřivení. Utváření třísky u nelegované oceli je pak ještě snazší v případě, že zvolíme velký posuv.

### 3.1.2 Průřez třísky

Velikost průřezu třísky je jedním z mnoha faktorů ovlivňujících průběh obrábění a charakter namáhání nástroje. Skutečný průřez třísky se od průřezu odřezávané vrstvy liší a to z důvodu plastických deformací. Obecný vztah pro absolutní velikost průřezu třísky  $A_{Sh}$

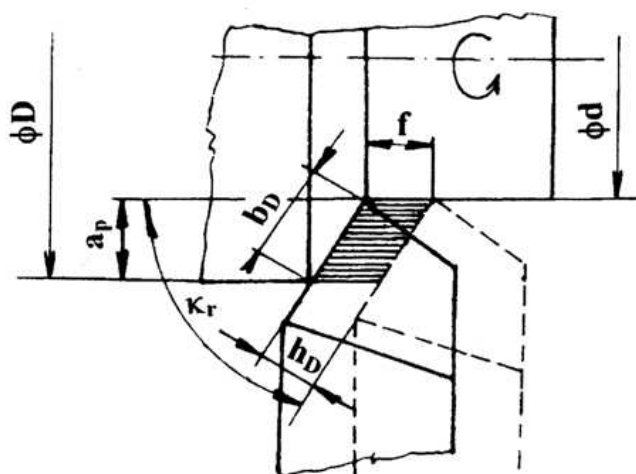
$$A_{Sh} = \frac{h_D \cdot b_D}{\sin \phi} \quad [mm^2] \quad (3.1)$$

kde:  $h_D$  – jmenovitá tloušťka řezu [mm]  
 $b_D$  – jmenovitá šířka řezu [mm]  
 $\phi$ ...úhel smykové roviny [°]

V případě že budeme při výpočtu uvažovat i poloměr špičky nástroje, bude střední tloušťka třísky dána vztahem

$$h_{Dm} = \frac{A_s}{l_s} = \frac{a_p \cdot f}{l_s} \quad [mm] \quad (3.2)$$

kde:  $l_s$  - skutečná délka ostří v záběru



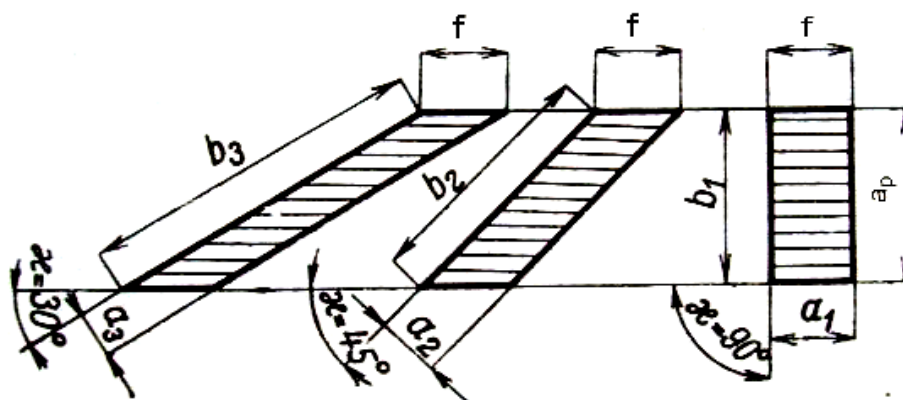
Obr. 21 Rozměr třísky při soustružení [16]

Tloušťka a šířka třísky jsou však při stejném posuvu a hloubce řezu závislé na úhlu nastavení hlavního ostří a jsou dány vztahem

$$a = f \cdot \sin \kappa \quad [\text{mm}] \quad (3.3)$$

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa} \quad [\text{mm}] \quad (3.4)$$

Při pohledu na obr. 22 je zřejmé, že při stejném posuvu a hloubce řezu se bude se zvětšujícím úhlem nastavení hlavního ostří zvětšovat tloušťka třísky a naopak zmenšovat šířka třísky.



Obr. 22 Rozměr třísky při různém úhlu nastavení hlavního ostří [2]

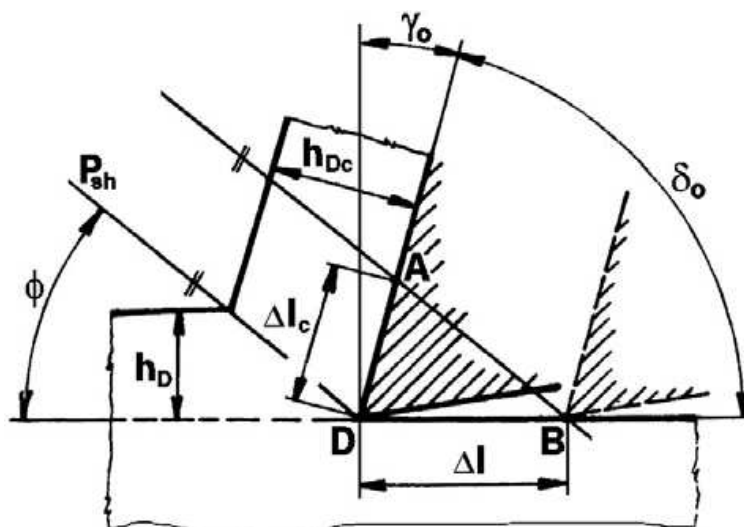
### 3.1.3 Pěchování třísky

Největší podíl na deformaci třísky má oblast primárních plastických deformací. Tvar a velikost této oblasti jsou závislé na vlastnostech obráběného materiálu, geometrii břitu, řezných podmínkách a na řezném prostředí.

V důsledku plastických deformací v oblasti primární plastické deformace dochází k pěchování třísky při jejím odchodu ze zóny řezání. Rozměry průřezu odcházející třísky jsou vždy větší než rozměry průřezu odřezávané vrstvy a délka třísky je naopak menší než délka odřezávané vrstvy. U ortogonálního řezání lze vycházet z rovnosti objemů odřezávané vrstvy a vzniklé třísky za jednotku času:

$$A_D \cdot v_c \cdot 10^{-3} = A_{Dc} \cdot v_t \cdot 10^{-3} \quad (3.5)$$

kde:  $A_D$  – jmenovitá plocha řezu [ $\text{mm}^2$ ]  
 $A_{Dc}$  – plocha průřezu třísky [ $\text{mm}^2$ ]  
 $v_c$  – řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]  
 $v_t$  – rychlost třísky [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]



Obr. 23 Pěchování třísky [18]

Součinitel pěchování třísky  $k_h$  slouží k posouzení intenzity primární plastické deformace při obrábění. Jeho velikost vyjádříme na základě vztahu 3.6:

$$k_h = \frac{A_{Dc}}{A_D} = \frac{v_c}{v_t} \geq 1 \quad (3.6)$$

přičemž platí

$$A_D = b_D \cdot h_D \quad (3.7)$$

$$A_{Dc} = b_{Dc} \cdot h_{Dc} \quad (3.8)$$

kde:  $b_{Dc}$  – šířka třísky [mm]  
 $h_{Dc}$  – tloušťka třísky [mm]

Vzhledem k tomu, že z praktického hlediska platí vztah

$$b_D \cong b_{Dc}, \quad (3.9)$$

Ize součinitel pěchování třísky vyjádřit vztahem

$$k_h = \frac{h_{Dc}}{h_D}. \quad (3.10)$$

Hodnotu  $h_{Dc}$  jsme schopni změřit například mikrometrem přímo na utvořené třísce.

### Objemový součinitel třísek

Bezprostředně po opuštění prostoru vzniku třísky, musí tříska nabývat určitého tvaru a rozměrů. Vždy se snažíme o to, aby třísky zaujímaly co nejmenší objem a to z důvodu manipulovatelnosti s třískou při odstraňování z pracovního prostoru stroje. Zejména pak v automatizovaných výrobních systémech dbáme na tento požadavek.

K vyjádření velikosti objemu, který třísky zaujmají, se zavádí tzv. objemový součinitel třísek  $K_{V0}$ . Je to poměr objemu třísek při jejich hromadění  $V_t$  k objemu, který zaujímal odřezávaný materiál před obráběním  $V_m$ . Objemový součinitel je vyjádřen následujícím vztahem:

$$k_{V0} = \frac{V_t}{V_m} > 1 \quad (3.11)$$

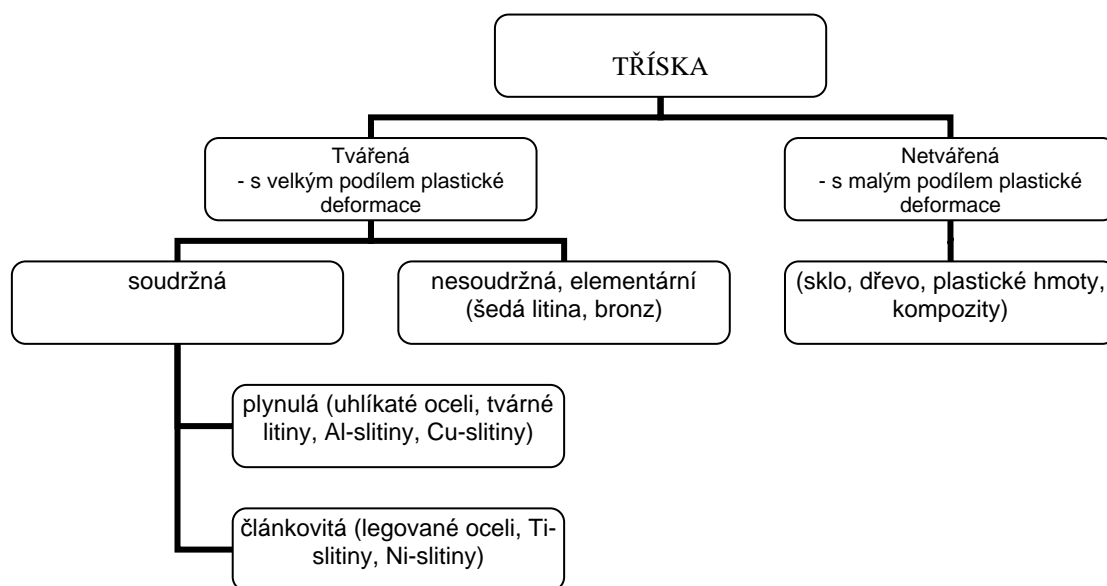
Tříska zaujímá při špatné geometrii břitu a nepříznivých řezných podmínkách velký objem, což vede k ohrožení plynulosti práce a tříska se z obráběcího stroje špatně odstraňuje. Co nejmenšího objemu dosáhneme například změnou geometrie břitu a řezných podmínek, volbou vhodného materiálu s tendencí tvořit drobnou třísku, či použití utvářečů třísek (platí pro nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami).

### 3.1.4 Základní tvary třísek

Tvar třísky je důležitým faktorem efektivního a bezpečného obrábění. Tvar třísky závisí na mnoha faktorech, zejména pak na těchto:

- vlastnosti obráběného materiálu
- geometrie nástroje
- tribologie rozhraní tříska-nástroj
- řezné podmínky, zejména řezná a posuvová rychlost

Na obrázku 24 je uvedeno základní rozdělení třísek. Třísky mohou nabývat různých tvarů – vinuté, smotané, krátké, dlouhé až po elementární segmentové, drobné atd. Pro praxi je z hlediska výrobních procesů a bezpečnosti práce nejžádanější tříska krátká, dělená.



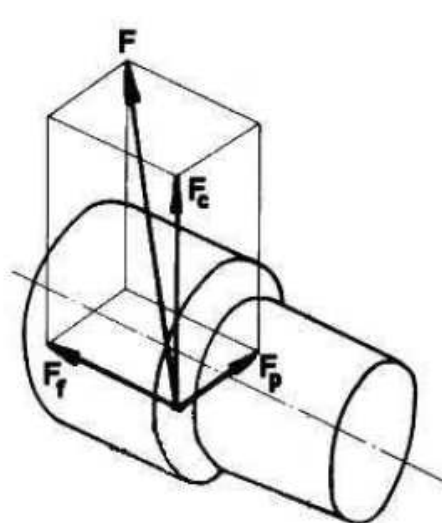
Obr. 24 Základní rozdělení druhů třísek [18]



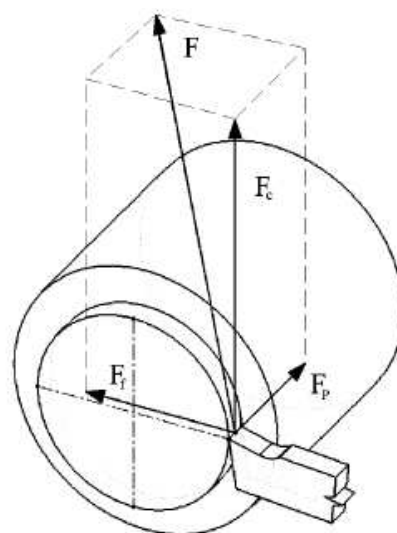
### 3.1.5 Řezné síly na nástroji

Obrábění kovů vyžaduje značné vynaložení síly na oddělení třísky od obrobku. Znalosti v oblasti řezných sil vedou k vyváženému řezání, zejména s ohledem na pozitivní průběh obrábění a stabilitu bříty. Z hlediska průřezu třísky v místě řezu existuje ve vztahu k rovině stříhu rovnováha sil. Síly působící na obrobek a třísku podél roviny stříhu a síly mezi čelem a třískou jsou v podstatě stejně velké. Obrázek 25 znázorňuje rozdělení výsledné řezné síly  $F$  na tři jednotlivé složky[1]:

- $F_c$  – řezná síla
- $F_p$  – pasivní síla
- $F_f$  – posuvová síla



Podélné soustružení [13]



Zapichování[14]

Obr. 25 Řezné síly působící na nástroj

Jednotlivé složky výsledné řezné síly  $F$  jsou dány empirickými vztahy:

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{X_{Fc}} \cdot f^{Y_{Fc}} \quad (3.12)$$

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{X_{Fp}} \cdot f^{Y_{Fp}} \quad (3.13)$$

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{X_{Ff}} \cdot f^{Y_{Ff}} \quad (3.14)$$

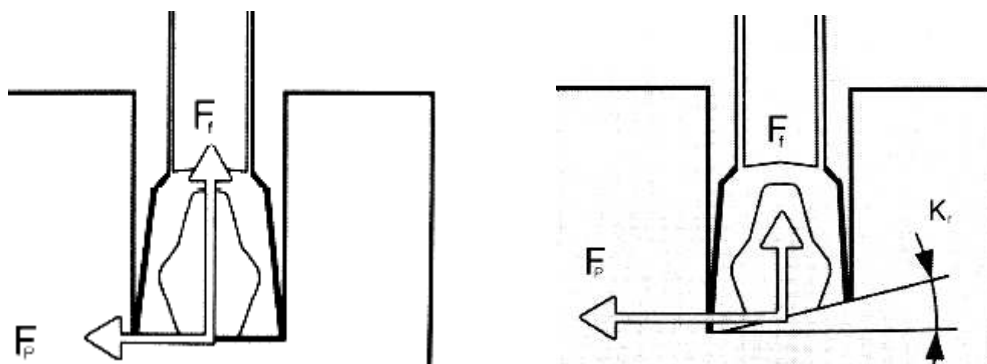
Výslednou složku řezné síly lze vypočítat ze vztahu:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \quad (3.15)$$

Exponenty  $X_{Fc}$ ,  $X_{Fp}$ ,  $X_{Ff}$ ,  $Y_{Fc}$ ,  $Y_{Fp}$ ,  $Y_{Ff}$ , nejsou stejně jako konstanty  $C_{Fc}$ ,  $C_{Fp}$ ,  $C_{Ff}$  fyzikálními veličinami, nýbrž byli stanoveny experimentem při daných řezných podmínkách. Tabulkové hodnoty těchto konstant se pohybují v rozmezí 0,4–1,3. V praxi je možné řezné síly teoreticky vypočítat pomocí výše uvedených vztahů. K přesnějšímu měření řezných sil používáme dynamometry.

Při operaci upichování rotuje obrobek a nástroj koná přímočarý posuvný pohyb. Stejně jako při čelním soustružení se nástroj pohybuje ve směru od obvodu obrobku k jeho ose, přičemž řezná rychlost klesá na nulu. Průměr obrobku se zmenšuje, až se obrobek pod vlivem posuvové složky řezné síly  $F_f$  odlomí dříve, než může nástroj dokončit úplné upíchnutí. Výstupek který zůstane na čele obrobku lze vhodnou geometrií bříty, změnou posuvu, nebo podepřením oddělované části zmenšit[1].

Při upichování je velikost složek celkové řezné síly zejména ovlivňována geometrií bříty. Pozitivní úhel čela má za následek malé řezné síly. Se zmenšující se pasivní silou  $F_p$  se zmenšuje zbytkový výstupek po upíchnutí. Úhel nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$  může mít různou velikost. U rovných, nebo tzv. neutrálních vyměnitelných břitových destiček je úhel nastavení hlavního ostří nulový (obr. 26). Se zvětšujícím se úhlem nastavení hlavního ostří se zvětšuje pasivní složka řezné síly  $F_p$  a destička je vytlačována celkovou řeznou silou do strany. Při velkém úhlu nastavení hlavního ostří může tato skutečnost vést až k tomu, že obrobená plocha čela je buďto konvexní nebo konkávní.

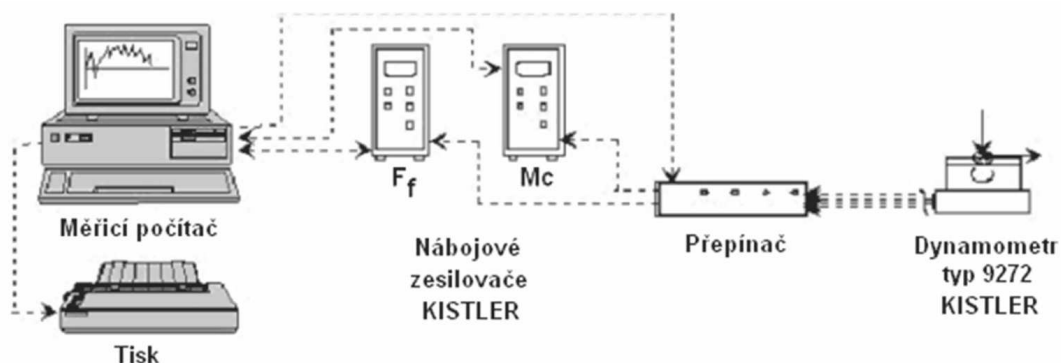


Obr. 26 Vliv úhlu nastavení hlavního ostří na složky celkové řezné síly [1]

Můžeme shrnout, že poměr velikosti složek řezné síly značně kolísá podle způsobu obrábění. Tangenciální síly jsou dominující zejména při frézování a soustružení. Radiální síla je důležitá při obrábění vnitřních ploch a axiální složka řezné síly je důležitá při vrtání[1].

### Měření řezných sil

K měření makroskopických řezných sil používáme dynamometry. Existuje řada dynamometrů jako mechanický, pneumatický, hydraulický, uhlíkové, indukční aj. Mezi nejčastěji používané patří piezoelektrické dynamometry firmy Kistler, které mohou být jak třísložkové, tak čtyřsložkové. Pomocí nábojových zesilovačů a vhodného softwaru jsme schopni zaznamenat řezné síly v PC.



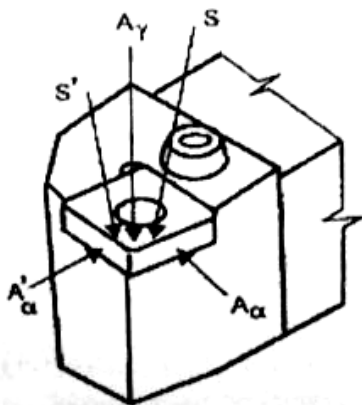
Obr. 27 Schéma měření pomocí piezoelektrické soustavy Kistler [25]

### 3.2 Faktory ovlivňující utváření třísky

Při obrábění existuje množství faktorů ovlivňujících, ať už pozitivně či negativně, utváření třísky. Tyto faktory mají svůj význam jedná-li se o správné utváření třísky, nebo-li o tzv. „kontrolovaný odchod třísky“ za různých řezných podmínek. Mezi tyto faktory patří například řezné síly, geometrie nástroje, pevnost nástroje, teploty, vibrace. Další nemalou roli ovlivňující utváření třísky zde hraje materiál obrobku, druh, pevnost, tvrdost, stav, tvar a velikost – všechny tyto složky se projeví na utváření třísky.

#### 3.2.1 Geometrie nástroje

Pro hodnocení geometrického uspořádání ploch na nástrojích dnes používáme mezinárodní normu ČSN 22 0011, ISO 3002/1-77. Základní charakteristikou této normy je pravoúhlý souřadnicový systém, který definuje jednotlivé souřadnicové roviny ve vztahu k rovině základní a jednotlivým plochám na nástroji[18].



Obr. 28 Základní geometrie VBD [18]

Čelo  $A_\gamma$  – plocha, po které odchází tříska

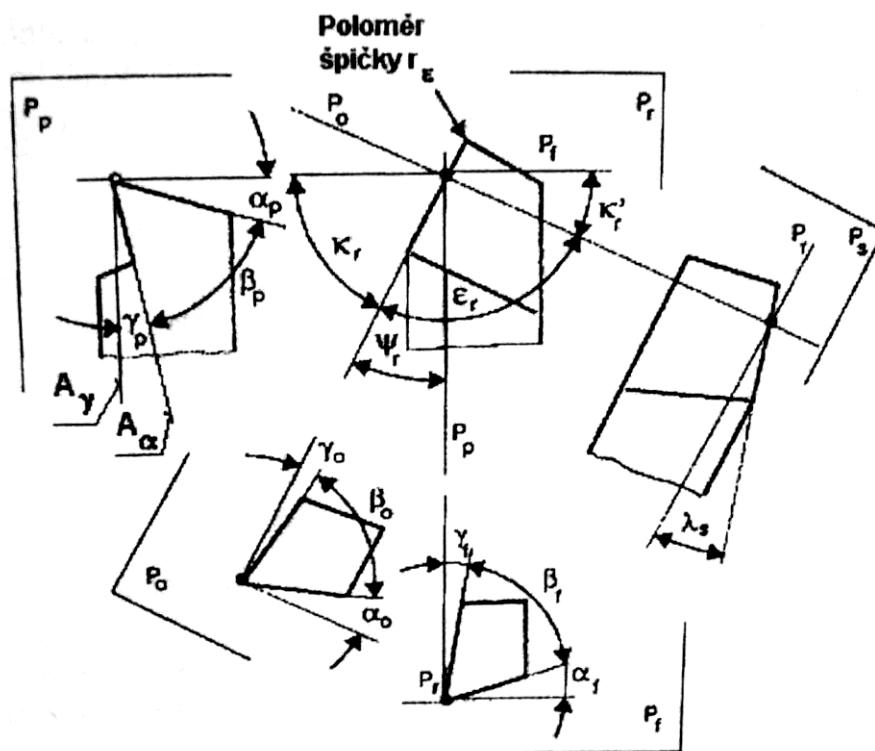
Hřbet ( $A_\alpha$ ,  $A_\alpha'$ ) – plocha, nebo souhrn ploch, které při řezném procesu směřují k ploše obrobku. Hlavní hřbet  $A_\alpha$  směřuje k přechodové ploše obrobku, vedlejší hřbet  $A_\alpha'$  směřuje k obrobené ploše obrobku

Ostří – prvek řezné části nástroje, kterým se realizuje vlastní proces řezání

Hlavní ostří  $S$  je část ostří, která začíná v bodě, kde nástrojový úhel nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$  je rovný nule a která má sloužit k vytvoření přechodové plochy na obrobku.

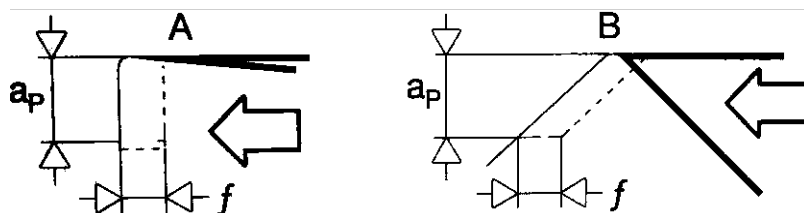
Vedlejší ostří  $S'$  je část ostří, kde nástrojový úhel nastavení ostří  $\kappa_r$  je ve směru od hlavního ostří rovný nule.

Volba nástrojových úhlů je v největší míře ovlivňována fyzikálními a mechanickými vlastnostmi, vlastnostmi nástrojového materiálu, řeznými podmínkami a požadovanou strukturou povrchu obrobku[18].



Obr.29 Nástrojová geometrie soustružnického nože [18]

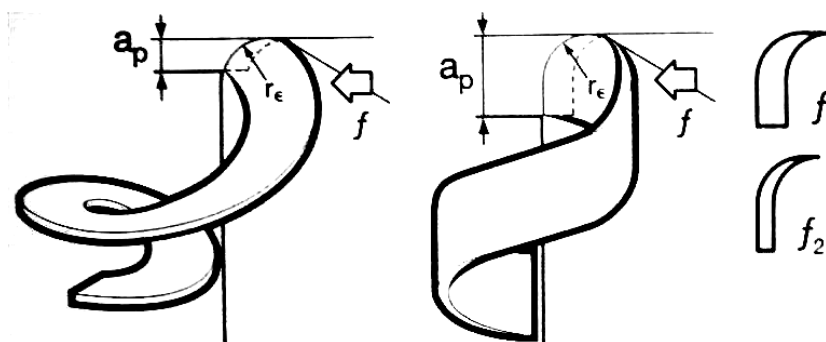
Významnou roli při utváření třísky hraje při obrábění úhel nastavení hlavního a vedlejšího ostří, obr. 30. Úhel nastavení hlavního ostří ovlivňuje utváření třísky tím, že se tloušťka třísky se zmenšováním úhlu snižuje a šířka třísky narůstá. Utváření třísky je snazší a hladší, je-li úhel nastavení menší ( $60^\circ - 45^\circ$ ). Proces obrábění s úhlem nastavení hlavního ostří  $90^\circ$  (obr. 30 A) se ukázal jako vhodný pouze pro několik málo operací, jako např. čelní a podélné soustružení. Ve většině případů neprobíhá proces obrábění ortogonálně, ale pod určitým úhlem vůči břitu. Tím se do značné míry mění geometrické podmínky a tím rovněž i směr odchodu třísky. Vznikají tak, mimo klasických tvarů třísky v podobě spirály, i jiné varianty tvarů jako článkovité třísky a třísky ve tvaru šroubovice. Dále zejména úhel nastavení vedlejšího ostří  $\kappa_r$  ovlivňuje strukturu povrchu obrobku, úhel hlavního ostří pak složky řezné síly, konkrétně poměr posuvové a pasivní síly  $F_f:F_p$ .



Obr. 30 Proces obrábění s úhlem nastavení hlavního ostří  $90^\circ$  a  $45^\circ$  [1]

Na směr odchodu třísky má podstatný vliv nástrojový úhel sklonu hlavního ostří  $\lambda_s$ . Pokud je úhel kladný, znamená to že tříska odchází směrem od obrobku, naopak pokud je záporný, tříska odchází směrem k obrobku. Hodnoty úhlu se pohybují běžně v rozsahu  $-6^\circ$  až  $+6^\circ$ .

Tvar a směr odchodu třísek se rovněž mění se změnou poloměru špičky břitu[1]. Poloměr špičky břitu je důležitou částí geometrie. Tak jak ovlivňuje směr odchodu třísky úhel nastavení hlavního ostří, stejně působí i poloměr špičky společně s hloubkou řezu. Malá hloubka řezu má za následek kapkovitý tvar třísky s malým úhlem směrem k břitu. U větších hloubek řezu hraje poloměr špičky menší roli, než úhel nastavení, který je směrodatný pro spirálovitou třísku, jejíž spirála směřuje ven (obr. 31). Rovněž velikost posuvu se projevuje v šířce průřezu třísky a působí také na samotný odchod třísky.



Obr. 31 Ovlivnění směru odchodu třísky změnou poloměru špičky / hloubky řezu [1]

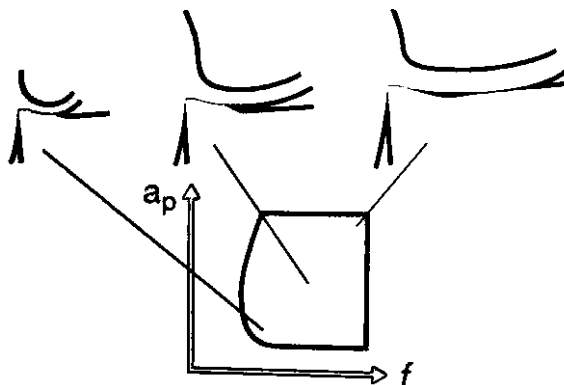
Samotné utváření třísky začíná počínajícím zakřivením při zářezu nástroje a je dále závislé na kombinaci řezných podmínek, zvláště posuvu a hloubky řezu, úhlech břitu, na druhu a vlastnostech materiálu obrobku a rovněž na velikosti poloměru špičky. Jakmile dojde k překročení velikosti posuvu nad přípustnou míru, určenou geometrií břitu, přeskočí jednoduše tříska utvářeč a vytváří tvary, jako by se jednalo o obrábění hladkými negativními vyměnitelnými břitovými destičkami, namísto použitých pozitivních geometrií s kontrolovaným odchodem třísky[1].

Třísky článkovité, nebo ve tvaru krátkých šroubovic jsou právě těmi třískami, které by měli být vytvářeny břitem provedeným podle nejnovějšího stavu techniky. Zakřivení, směr, stoupání šroubovice a tvar třísky lze nyní ovlivnit konstrukcí geometrie břitu. Každá vyměnitelná břitová destička je vybavena geometrií, která v rozsahu stanovené oblasti posuvu a hloubky řezu zajišťuje u přiřazených materiálů obrobku kontrolovaný odchod třísky. Destička pro dokončování, u které je v záběru hlavně poloměr špičky, musí být kladen důraz zejména na jasné stanovení geometrie špičky břitu, naopak u hrubovací destičky je pak důležitá geometrie čela.

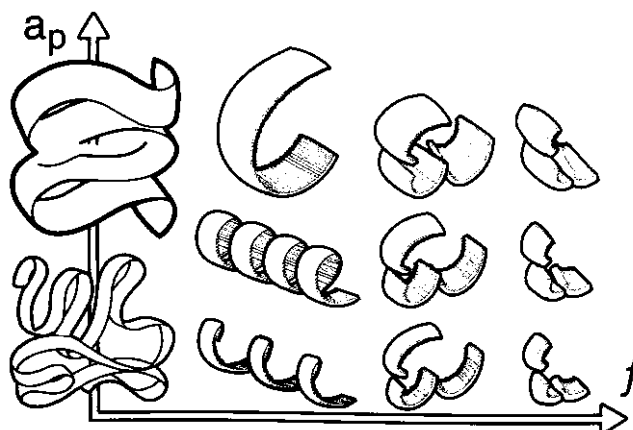
### 3.2.2 Řezné podmínky

Řezné podmínky ovlivňují velikost a tvar třísky přímo, přičemž posuv a hloubka řezu se projeví ve větší míře než řezná rychlost.

Na obr.32 a obr.33 je zobrazena závislost utváření třísky na hloubce řezu  $a_p$  na posuvu  $f$ . Třísky ležící mimo tuto oblast se vyskytují buďto jako dlouhé, tenké chomáče, nebo v podobě tlustých přelámaných článků.



Obr. 32 Funkční diagram utváření třísky [1]



Obr. 33 Tvary třísek v závislosti na  $a_p$  a  $f$  [1]

### 3.2.3 Utvářeče třísek

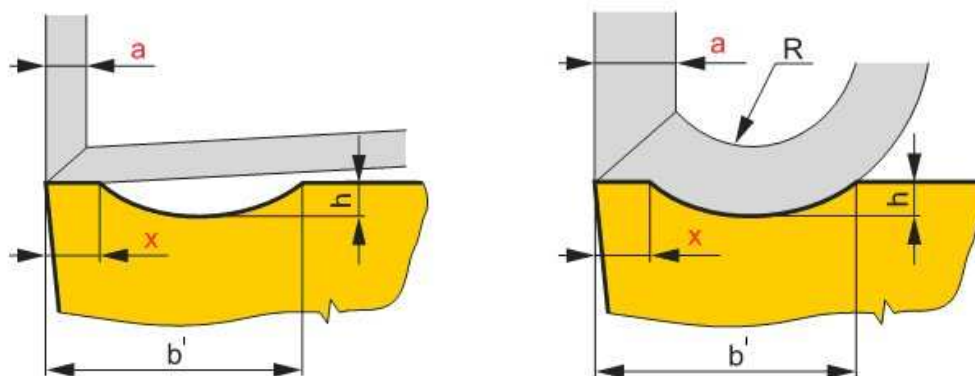
Velmi vhodným a mnohdy jediným způsobem jak zmenšit objemový součinitel třísek jsou lamače a utvářeče třísek. Provedení utvářečů třísek rozhoduje o schopnosti účinně ovlivňovat tvar třísky při různých rychlostech posuvu. Některá provedení omezují použití břitu na malou oblast pro malé posuvy a hloubky řezů, jiné disponují celou paletou možností utváření třísky. Utvářeč třísky na poloměru špičky může vést také nejmenší třísky, zatímco při vyšších posuvech nejprve přejímá funkci utvářeče hlavní břit a poté u těžkých řezů přejímá funkci utvářeč třísky na čele.

U nožů s pájenými plátky se docílí oddělení (lámání) třísky právě vybroušením lamačů na čele ve stupňovitém tvaru podél hlavního ostří. U nožů s vyměnitelnými břitovými destičkami se třísky utvářejí příloženými lamači nebo lamači předlísovanými na břitové destičce. Hloubka a šířka lamače se volí podle velikosti nože a podle zkušeností. Zadní hrana lamače může svírat

s břítem úhel, který bývá v rozmezí  $5^\circ - 15^\circ$  a ovlivňuje směr odchodu třísky. Lamač třísky se vybrušuje brousícím kotoučem do nástroje. Nejběžnější lamače třísky jsou stupínkové a žlábkové. Rozměry stupínku i žlábků jsou stanoveny v závislosti na posuvu, hloubce řezu a na jakosti obráběného materiálu. Hospodárnějším (nenarušujeme čelo břítu) a univerzálnějším způsobem jsou stavitelné lamače třísek, kterých je mnoho konstrukcí.

Zvláště důležitou pozornost volbě vhodného utvářeče musíme věnovat u automatických a programově řízených obráběcích strojů. Třísky se v žádném případě nesmí namotávat na obrobek a tím znesnadňovat obráběcí proces.

Určitý typ utvářeče utváří (láme třísku) pouze v určitém rozmezí posuvu a hloubky řezu. Minimální posuv, při kterém začíná utvářeč fungovat, je závislý především na šířce stabilizační fazetky  $x$  a na jejím úhlu  $\gamma_x$ . Maximální posuv při kterém končí funkce utvářeče je závislý u žlábkového utvářeče na vzdálenosti výstupní hrany žlábků od ostří  $b'$  a na hloubce žlábků  $h$  (obr.34)[22].



a) tloušťka odřezávané vrstvy  $a$  je výrazně menší než šířka fazetky  $x$ , dochází ke kontaktu třísky jen na fazetce a tříska tudíž nemůže být utvářena

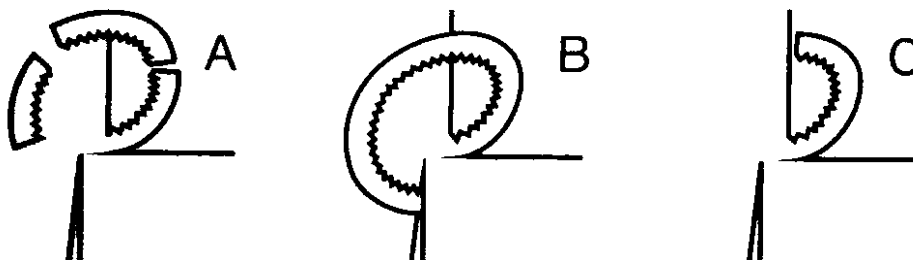
b) použijeme-li větší tloušťku odebírané vrstvy  $a$ , přičemž  $x < a$ , tříska vniká do utvářeče a je jím utvářena – zakřivena pod určitým poloměrem  $R$

Obr. 34 Závislost utváření třísky na geometrii utvářeče [22]

### Lámání třísky

Existují rozdílné druhy lomu třísky:

- samočinný lom
- lom třísky na nástroji
- lom třísky při nárazu na obrobek



Obr. 35 Tři způsoby lomu třísky [1] – A) samočinný lom, B) lom třísky na nástroji, C) lom třísky při nárazu na obrobek

Všechny tyto tři alternativy mají svoje výhody a nevýhody. U samočinného lomu hraje rozhodující roli nutnost nalezení správného směru odchodu třísky. V případě lomu třísky na nástroji jsou příčinou kladivovým efektem vyvolaná vysoká zatížení v oblasti břitu[1]. Nekontrolovanému odchodu třísky je nutné zabránit, protože může vést k lomu nástroje, ke špatným výsledkům obrábění, ke vzniku prostožů a poranění obsluhy stroje. K tomu nám slouží právě utvářeče třísky.

U materiálů s krátkou třískou vyžadujeme malou a nebo vůbec žádnou pomoc v podobě utvářeče třísky. Naopak u materiálů vytvářejících dlouhou třísku vyžadujeme utvářeče třísky, které jsou při slinování vytvářeny přímo do čela VBD a které třísky vhodným způsobem usměrňují a nakonec i lámou. Počáteční zakřivení třísky ve většině případů nestačí k odlomení třísky v požadovaných délkách. Lamač třísek ve své nejjednodušší podobě je překážkou vestavěnou do směru odchodu třísky. Tento hrubý způsob má celou řadu nevýhod a působí velmi nepříznivě na výkon stroje. Moderní vyměnitelná břitová destička disponuje komplexní kombinací úhlů, ploch a rádiusů, čímž je umožněno ovlivňovat utváření třísky samotné, ale také kontaktní délku, lom třísky atd.



## **4 OBRÁBĚNÍ NEKOVOVÝCH MATERIÁLŮ**

### **4.1 Obrábění konstrukčních keramik**

Součásti z konstrukčních keramik obvykle vyrábíme odléváním nebo lisováním. V případě že pro nás přesnost součásti není rozhodující, snažíme se součást vyrobít již v konečném tvaru, abychom se vyhnuli dalšímu opracování. Ne vždy se však můžeme tomuto vyhnout a součásti, které vyžadují větší přesnost, musíme dále obrábět.

Při výrobě keramických dílců do navrhovaných strojů a zařízení jsme nuceni obrábět tyto součásti pomocí výkonné obráběcí technologie. Vzhledem k vysoké hodnotě tvrdosti konstrukčních keramik řezný nástroj do obrobku vniká obtížně a důsledkem toho se také rychle opotřebovává, či zcela úplně zničí. Výhodu při obrábění však zůstává křehkost keramiky, která má pozitivní vliv na tvoření trhlin a tím i tvoření třísky. Z hlediska funkce součásti je to naopak neblahý vliv a to z důvodu vzniklých mikrotrhlin, které mohou snížit pevnost vyrobených součástí.

Existuje celá řada metod obrábění keramických materiálů. Protože keramika má vysokou tvrdost a křehkost, jsou k jejímu obrábění využívány zejména dokončovací metody a to broušení a lapování s malým úběrem materiálu. Dále pak můžeme aplikovat i soustružení, vrtání, popřípadě frézování.

K obrábění keramik používáme supertvrdé materiály. Jsou to technické materiály, které svými vlastnostmi (především tvrdostí a otěruvzdorností) převyšují běžné materiály. Radíme sem polykrystalické materiály na bázi diamantu (PKD) a na bázi kubického nitridu boru (PKBN). Nástroje a vyměnitelné břitové destičky osazené PKD se používají jak pro obrábění neželezných kovů a slitin, tak i k obrábění keramických a plastických hmot a jiných kompozitních materiálů s abrazivní složkou. Nástroje z výkonných řezných materiálů nalézají stále širší uplatnění. Stroje musí mít dostatečný výkon a rozsah otáček, vysokou tuhost a přesnost chodu vřetene, zakrytovaný pracovní prostor a zajištěn odvod třísek.

#### **Porovnání s třískovým obráběním kovů**

Nástroje na obrábění keramických materiálů nejsou samozřejmě univerzálně použitelné pro všechny druhy obráběných materiálů a rozhodně nevytlačí klasické obráběcí materiály, jako jsou slinuté karbidy či rychlořezná ocel apod. Při obrábění keramiky soustružením, nebo frézováním vzniká dělená segmentovaná tříska.

### **4.2 Obrábění plastů**

Ve strojírenské praxi existuje řada aplikací, které je výhodné řešit pomocí plastů a kompozitů, ale jedná se o malosériovou nebo kusovou výrobu. Pro tyto případy se jako velice perspektivní jeví třískové obrábění polotovarů (desky, tyče), vyrobených zejména z konstrukčních nebo speciálních plastů. Obrábění plastů je i do budoucna perspektivní pro výrobu dílů výrobních linek, unikátních nebo robustních zařízení a strojů, u kterých se použitím plastů a

kompozitů dosáhne originálního řešení s významnými technickými i ekonomickými efekty.

Třískové obrábění plastů zůstává i v současnosti nezastupitelnou zpracovatelskou technologií pro jejich aplikace. V praxi se jedná třeba o modely, prototypové ověřovací díly pro pozdější přechod na sériovou výrobu a součásti unikátních zařízení, zejména výrobní sféry. Velmi žádaná je i výroba plastových dílů pro havarovaná zařízení nebo těžko dostupné součástky zahraničních strojů[12].

### **Specifika obrábění plastů**

Obrábění plastů musí respektovat některé odlišnosti vlastností a chování polymerů oproti kovům a je třeba k tomu přizpůsobit parametry technologického procesu. Především u termoplastů je nutné eliminovat vznik nežádoucího tepla, které vzniká třením nástroje o obrobek. Jelikož plasty mají špatnou tepelnou vodivost, kumuluje se teplo v obrobku, který pak měkne. Řešením je vhodné chlazení nebo nastavení optimálních zpracovatelských parametrů. Nízký modul pružnosti plastů a potažmo i nižší tuhost obrobku může být komplikací při upínání i u samotného obrábění. Doporučují se nižší řezné a upínací síly, působící ve více bodech. Tolerance obrábění termoplastů jsou ve třídě přesnosti IT 9-11. Kvalitu povrchu ovlivňuje správná volba ostrého nástroje s přesnou břitovou geometrií[12].

Všeobecná doporučení při obrábění polotovarů technických plastů:

- nástroje musí být udržovány neustále hladké a ostré
- posuv by měl být co největší
- nástroje musí mít takový tvar aby se obráběného materiálu dotýkaly jen řeznou plochou
- musí být zajištěn co nejlepší odvod třísky
- při operacích kdy vzniká nadměrné teplo (vrtání), je vhodné použít chladicí médium

### **Porovnání s třískovým obráběním kovů**

Při soustružení vznikají dlouhé „řetězce“ třísek a ty je nutno vhodným způsobem při práci odstraňovat, aby se nezamotávaly do upínací hlavy, nástroje nebo obrobku.

Pro plasty je typická nízká tepelná vodivost. Zatímco u plastů zhruba 85% tepla odchází do nástroje, 5% do obrobku a 10% tepla je odváděno třískou, u kovů je to naopak, přičemž největší množství tepla odchází do třísky. Plasty mají dvakrát až třikrát menší řezný odpor než kovy, což je výhodou, protože spotřebujeme méně energie.

### 4.3 Obrábění dřeva

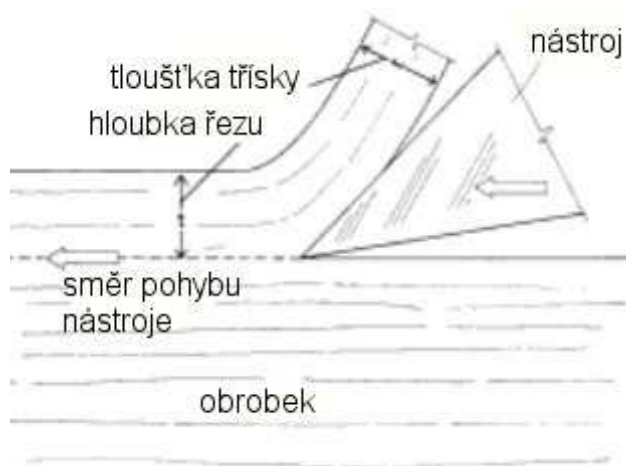
Při obrábění dřeva rozlišujeme dva základní případy obrábění. Nástroj proniká do materiálu, odděluje jeho určitou část a přitom narušuje vzájemnou vazbu dřevních vláken. Tento způsob může být:

- Beztržkový – oddělovaná část je přímo výrobkem
- Tržkový – v tomto případě je oddělená část vedlejší produkt (piliny, hobliny atd.)

Nástroje pro obrábění dřeva jsou charakterizovány počtem, tvarem a velikostí jejich aktivních pracovních částí – břitů. Břitem rozumíme klínovou část nástroje, která vniká do obrobku. Tyto nástroje pak rozdělujeme jako:

- Jednobřítové (dláta, nože, hoblíkové nože atd.)
- Mnohobřítové (pilové listy, pilové kotouče, frézy atd.) [3].

Utváření třísky se týká zejména geometrie nástroje, stavu obráběného materiálu, a pohybu nástroje vzhledem k orientaci struktury dřeva. Na obr.36 je znázorněn ideální obráběcí děj. Nejvíce energie vstřebává tržka, protože dřevo klade nepatrný odpor. Geometrie nástroje je v podstatě stejná jako u soustružnického nože.



Obr. 36 Utváření třísky [15]

U tržkového obrábění dřeva rozlišujeme dva základní způsoby obrábění. První z nich je „ortogonální obrábění“, kdy je hrana nástroje kolmá na směr pohybu. Řez je rovnoběžný s originálním povrchem obrobku a utváří se souvislá třísky. Druhým způsobem je „periferní obrábění“. Rotující nástroj s jedním nebo více břity postupně zajiždí do materiálu, přičemž každý břit nástroje odebírá třísku zvlášť, tudíž třísky je dělená [15].

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 5.1 Plán experimentu

Cílem experimentu bylo zajištění podmínek pro analýzu tvorby třísky pomocí vysokorychlostní digitální videokamery a zaznamenání tvorby třísky a její závislosti na změně řezných podmínek, zejména pak na hloubce řezu  $a_p$  a velikosti posuvu  $f$ , při podélném soustružení. Experiment probíhal v soustružnické dílně FSI VUT v Brně, ÚST Odboru technologie obrábění. K experimentu jsme použili vysokorychlostní kameru od firmy Fastec Imaging, která nabízí celou škálu vysokorychlostních digitálních kamer. Právě kamera TroubleShooter 1000, jež je majetkem školy, byla využita k experimentu. Tuto kameru je možné použít jak v průmyslu, tak v laboratořích a stejně tak i v terénu, jelikož tato kamera je jednou z prvních ve světě opravdu přenosnou vysokorychlostní kamerou, kterou můžete vzít kamkoliv s sebou.

#### 5.1.1 Příslušenství kamery

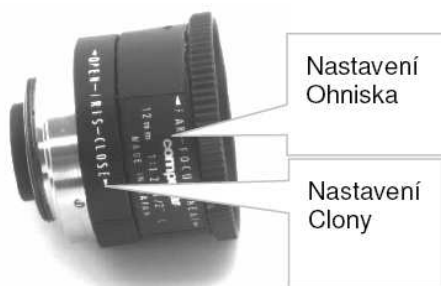
Základní sestava po zakoupení zahrnuje vysokorychlostní digitální kameru TroubleShooter 1000, externí 6V DC napájecí zdroj, příručku ke kameře a CD-ROM s instalačním softwarem podporující práci s kamerou. Základní sestavu lze dále doplnit o některé příslušenství a sice komunikační USB 2.0 kabel pro propojení s vaším počítačem, dobíječ baterií pro NiMH baterie, NiMH baterii typu D, CF karty různých kapacit, externí přídavné světlo a v neposlední řadě o objektivy různých světelností, formátů a ohniskových vzdáleností.



Obr. 37 Základní sestava

### 5.1.2 Objektivy

Právě volba vhodného objektivu je jedním z prvních kroků k úspěšnému provedení experimentu. Jakmile je objektiv připevněn je zapotřebí nastavit světlost clony a ohnisko na vhodné hodnoty. Plně spuštěná clona způsobí, že kamera bude při maximální rychlosti snímat s malým množstvím světla, ale s velkou hloubkou obrazu. Kamera bude zachytávat pouze objekty, které jsou v blízkosti kamery. Naopak malá nebo úplně zavřená clona umožní lepší prostorové snímání, ale vyžaduje více světla při vyšších rychlostech nahrávání. V příloze 3 je názorně vidět, že se stoupající rychlostí nahrávání, potřebujeme větší množství světla k nasvícení měřeného objektu.



Obr. 38 Objektiv s ohniskovou vzdáleností 12mm [4]

Důležitou vlastností objektivu je jeho zorný úhel. O tom jak velký je zorný úhel objektivu rozhoduje velikost senzoru ve videokamere. Čím větší je senzor, tím se stejným objektivem dosáhneme širšího zorného úhlu a naopak. V našem případě je velikost senzoru neměnná. Na obr.39 je vidět, jak se se změnou ohniskové vzdálenosti  $f_o$  mění zorný úhel. Čím je ohnisko kratší, tím je zorný úhel širší. To jak se s ohniskovou vzdáleností objektivů mění jejich zorný úhel, vidíme v tab.3. V přípravě na experiment jsme vybírali z pěti objektivů o ohniskových vzdálenostech 3,6; 6; 12; 25 a 50 mm.

Velikost senzoru videokamery je 9x9 mm.

Velikost zorného úhlu vypočítáme ze vztahu:

$$Z = 2 \cdot \arctg(S_{hv} / f_o / 2) \quad (5.1)$$

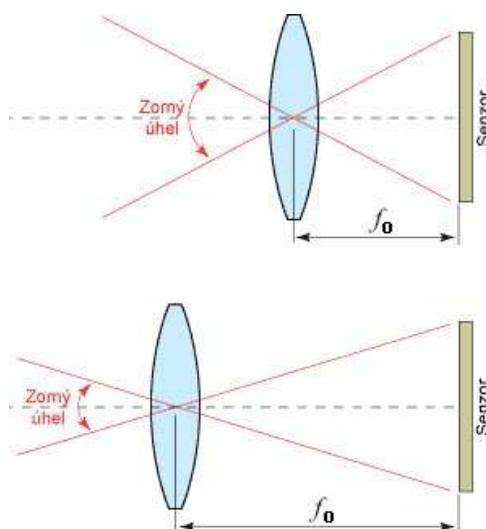
kde: Z..... zorný úhel objektivu [°]

$S_{hv}$ .....rozměr senzoru [mm], když dosadíme horizontální rozměr senzoru, tak vypočteme horizontální vyzařovací úhel a naopak

$f_o$ .....ohnisková vzdálenost objektivu [mm]

Tab.3 Vyzařovací úhel objektivů o různé ohniskové vzdálenosti

Ohnisková vzdálenost objektivu [mm]	3,6	6	12	25	50
Zorný úhel [°]	100	75	40	20	10



Obr. 39 Vliv ohniskové vzdálenosti objektivu na velikost zorného úhlu

### 5.1.3 Externí přídavné světlo

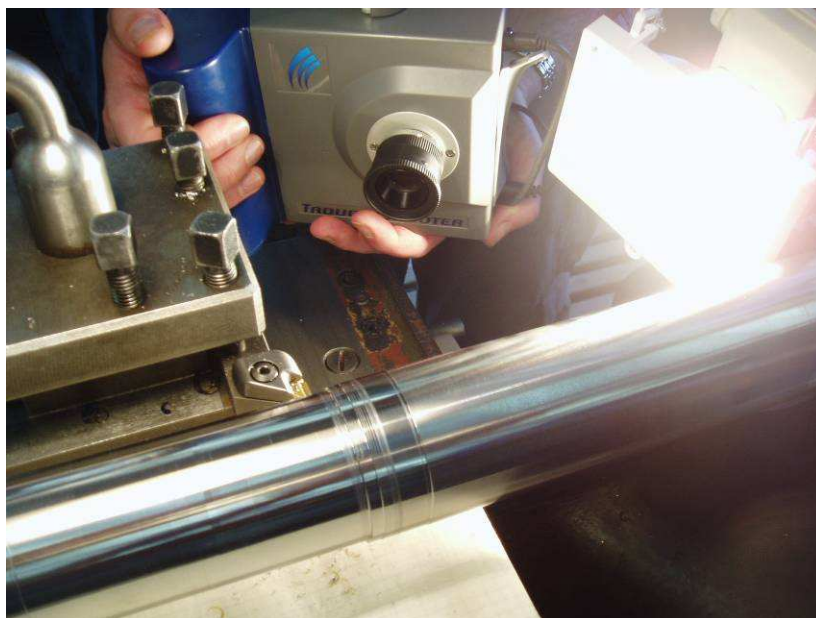
Externí osvětlení je velice důležitou součástí experimentu. V praxi je nejběžnější umístění světelného zdroje za kamerou, nebo souběžně s objektivem, tzn. přední osvětlení objektu. Boční osvětlení je další běžnou osvětlovací technikou, přičemž zdroje světla jsou umístěny pod určitým úhlem. Podrobně jsme se různými typy osvětlovačů zabývali v kapitole 1.6. V dnešní době nejpoužívanější osvětlovače, sestavené z LED diod, jsme bohužel neměli při experimentu k dispozici.

Jako alternativní zdroj osvětlení můžou být použity halogenové lampy o různých výkonech, různé čočky, odrazová skla, bílé pozadí, běžné žárovky atd. Halogenová lampa, dosahující teploty až 3200 K (600°C), je velice efektivním osvětlením, ale při práci s touto lampou musíme dbát na opatrnost vzhledem k vysoké teplotě a náchylnosti k poškození. To může být problémem zejména při manipulaci s lampou v pracovním prostoru stroje. Vzhledem k relativně nízkému příkonu použitého halogenového osvětlovače při experimentu, bylo nutné jej přiblížit na vzdálenost v řádech centimetrů. Tento způsob osvětlení však rozhodně není z praktického hlediska ideální, zejména pak omezuje už tak malý prostor pro manipulaci s kamerou, obr. 41 a obr. 42.

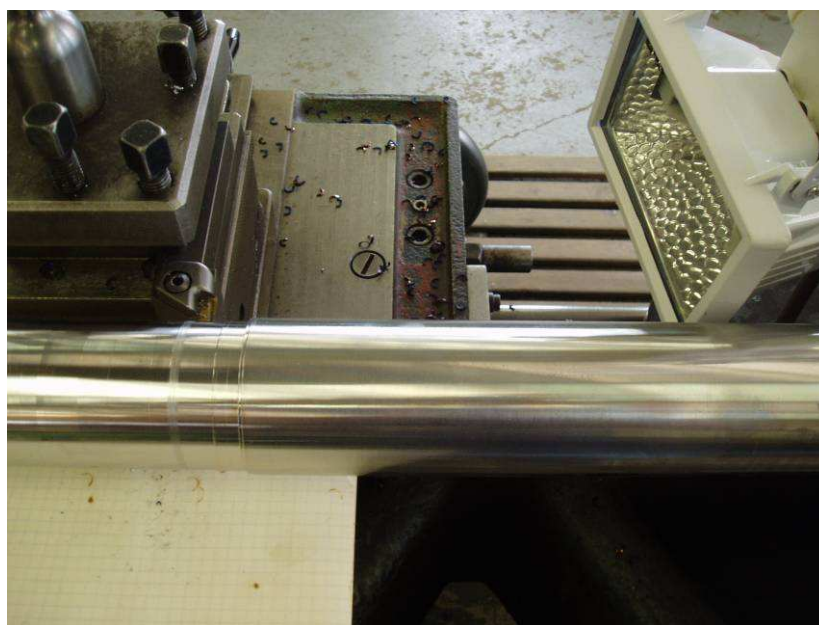


Obr. 40 Soustružnická dílna



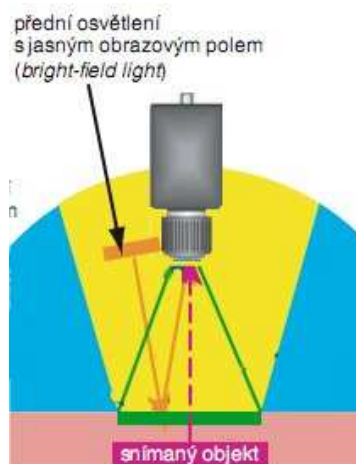


Obr. 41 Uspořádání zařízení při experimentu



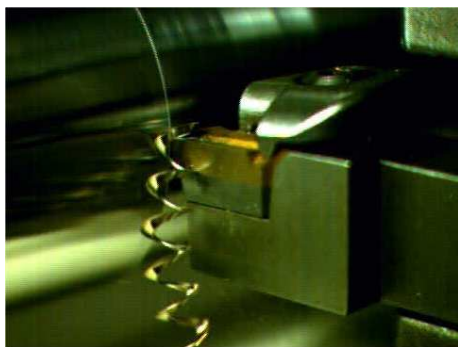
Obr. 42 Osvětlení bylo nutné z blízkosti několika centimetrů

Způsob osvětlování soustavy byl omezen množstvím světelných zdrojů a to, na umělé osvětlení pracoviště klasickými zářivkami, prostupující denní světlo na pracoviště a halogenovou lampu o výkonu 250W. Z důvodu nízké intenzity osvětlení a s tím související vzdálenosti světelného zdroje od objektu, byla v podstatě dána i geometrie osvětlení. Využili jsme metodu předního (přímého) osvětlení s jasným obrazovým polem (obr. 43). Světlo odražené od objektů tak dopadalo přes objektiv na obrazový snímač. Naprosto nezbytné v tomto případě bylo použití bílého pozadí. Metod jak vytvořit bílé pozadí je více. Vyzkoušeli jsme lesklý fotografický papír, bílou plastovou podložku a kladívkový papír. Jako nejvhodnější se ukázalo použití kladívkového papíru o gramáži 150g.



Obr. 43 Přední (přímé) osvětlení s jasným obrazovým polem

Jedním z cílů experimentu bylo využít maximálního rozsahu rychlosti snímání kamery. Skutečnost však vypadala jinak. Při rychlosti snímání záznamu 1000 snímků za sekundu (maximální rychlost použité rychlostní kamery) je zapotřebí vysoce výkonného osvětlení. Halogenová lampy o výkonu 250 W tuto podmínku nesplňovala a z toho důvodu jsme byli schopni zaznamenávat pouze s frekvencí 250 snímků za sekundu. Při nastavení rychlosti nahrávání na 500 snímků za sekundu byl již obraz zjevně tmavý a proto nepoužitelný (obr. 44 a 45).



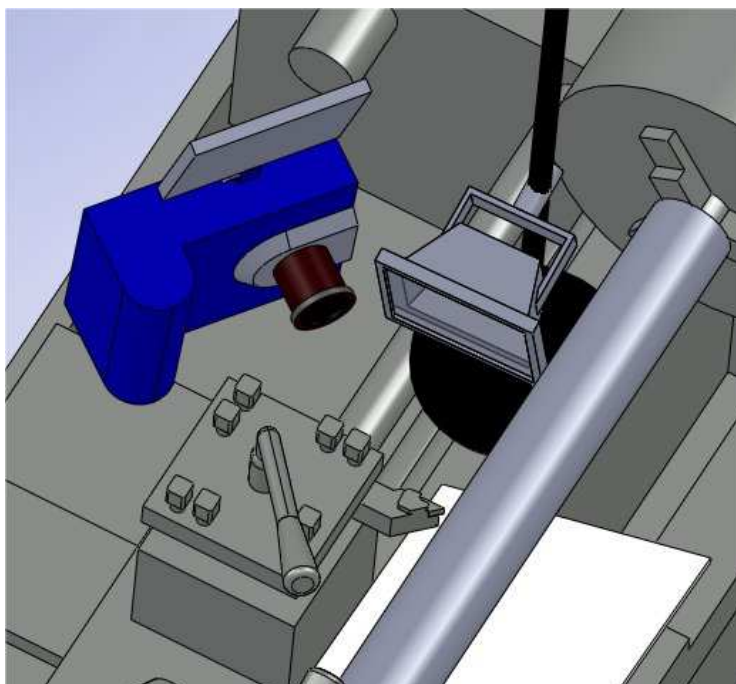
Obr. 44 Rychlost záznamu 250 fps



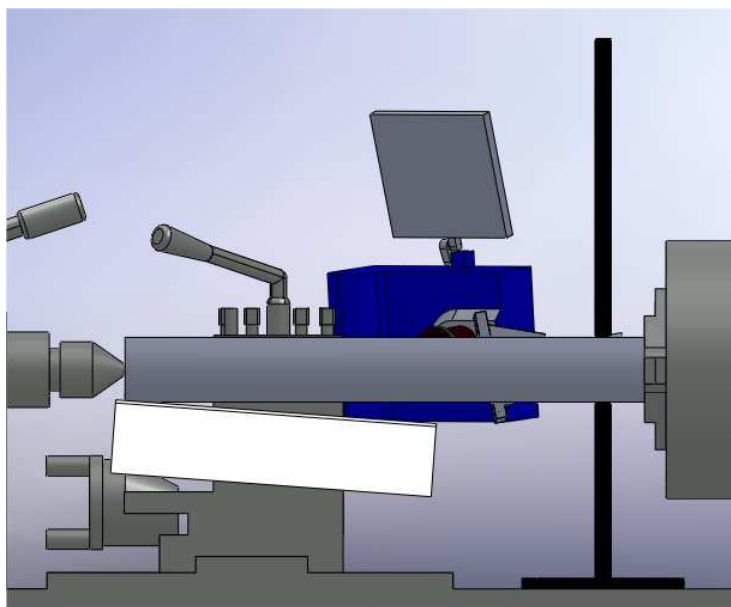
Obr. 45 Rychlost záznamu 500 fps



Na následujících obrázcích (obr. 46 a obr. 47) je vymodelována situace osvětlení a poloha kamery při snímání během experimentu. Přílohy 4,5 obsahují namodelování dalších způsobů osvětlení. V praxi však bude rozhodujícím faktorem pro způsob osvětlení hlavně typ obráběcího stroje, či výrobní linky aj., kdežto v diplomové práci se zabýváme pouze obráběním na univerzálním soustruhu SV 18-RD.



Obr. 46 Osvětlení halogenovou lampou o příkonu 250W



Obr. 47 Použití kladívkového papíru pro vytvoření bílého pozadí

#### 5.1.4 Použitá zařízení

**Stroj:** univerzální hrotový soustruh SV 18-RD, výrobce TOS Trenčín

Základní parametry stroje:

- |   |                               |
|---|-------------------------------|
| • oběžný průměr nad ložem                   | 380 mm                        |
| • oběžný průměr nad suportem                | 250 mm                        |
| • vzdálenost hrotů                          | 750 mm                        |
| • rozměr 4-nožové hlavy                     | 160 x 160 mm                  |
| • výkon hlavního motoru                     | 10 kW                         |
| • rozměry stroje (š x d x v)                | 950 x 2720 x 1210 mm          |
| • hmotnost stroje                           | 1950 kg                       |
| • stroj je upraven plynulou regulací otáček |                               |
| • otáčky vřetene                            | 15,4 – 2800 min <sup>-1</sup> |
| • posuv v podélném směru                    | 0,05 – 0,7 mm                 |
| • posuv příčném směru                       | 0,025 – 0,35 mm               |

**Obráběný materiál:** kulatina Ø60–500, předsoustružená tyč z oceli 11 600, tažená za tepla dle ČSN 42 6510.

**Břitová destička:** KNUX 160405ER-72, řezný mat. 6630, výrobce PRAMET

- univerzální řezná geometrie charakterizovaná nízkým řezným odporem
- jemné a dokončovací soustružení



Obr. 48 VBD



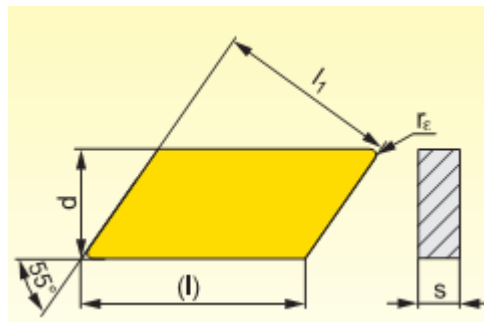
Obr. 49 Nožový držák

#### Řezný materiál 6630

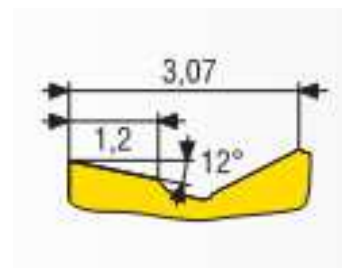
Řezný materiál 6630 lze z hlediska použití charakterizovat jako „nejuniverzálnější“ z celé řady 6000. Materiál 6630 je univerzální pro soustružení ocelí se širokou aplikační oblastí. Je také vhodný pro obrábění korozivzdorných ocelí, lze ho použít i pro obrábění litiny a podmíněně i některých super slitin. Spojuje dobrou otěruvzdornost s vysokou houževnatostí.

Popis materiálu[22]:

- funkčně gradientní substrát
- střední povlak s nosnou vrstvou TiCN nanesený metodou MTCVD
- pro dokončovací až hrubovací soustružení
- obrábění materiálů skupin P, M a dále K a podmíněně aplikovatelný i pro skupinu S a N
- pro střední a podmíněně vyšší řezné rychlosti
- kontinuální i přerušovaný řez



Obr. 50 VBD KNUX 160405ER-72 [22]



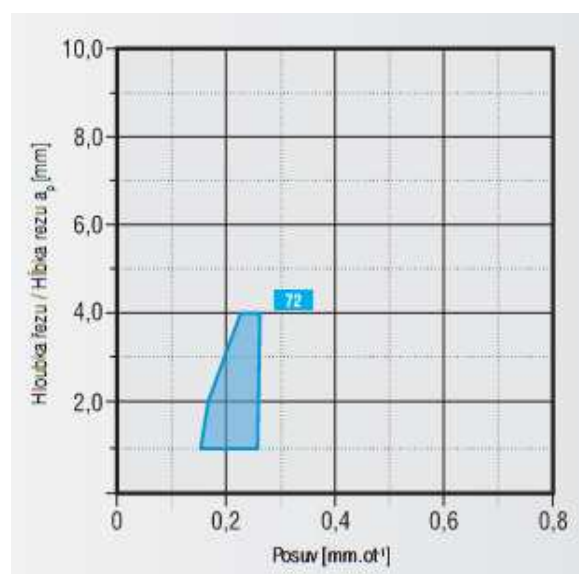
Obr. 51 Profil hlavního břitu [22]

Tab. 4 Geometrické parametry VBD [22]

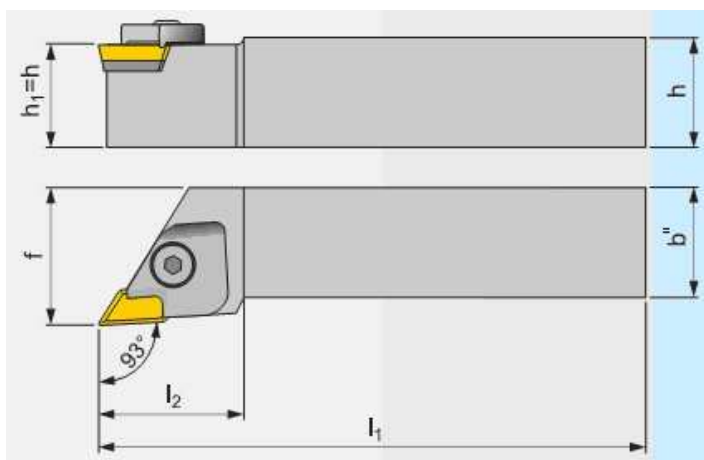
(l)	$l_1$	d	s
16	16,15	9,525	4,76

Tab. 5 Řezné parametry VBD [22]

$r_\epsilon$	$f_{\min}$	$f_{\max}$	$a_{p \min}$	$a_{p \max}$
0,5	0,15	0,23	0,5	4



Obr. 52 Funkční diagram VBD [22]

**Nožový držák: CKJNR/L 2020 K16**

Obr. 53 Nožový držák CKJNR/L 2020 K 16 [22]

Tab. 6 Geometrické parametry [22]

$h=h_1$	$b''$	$f$	$l_1$	$l_{2max}$	$\lambda_s^\circ$	$\gamma_0^\circ$
20	20	30	125	34	+1	-5

**Další použitá zařízení:**

- halogenová lampy o příkonu 250W

**5.1.5 Popis experimentu**

Obrábění probíhalo na hrotovém soustruhu SV 18-RD. Do sklíčidla jsme upnuli obráběný vzorek, tyč z materiálu 11 600, a podepřeli koníkem pomocí středícího důlku. Prvním krokem bylo nastavení optimálních řezných podmínek. Dalším krokem byl výběr objektivu, který budeme používat při snímání. Na základě experimentálního porovnání jednotlivých objektivů o různých ohniskových vzdálenostech, byla vytvořena tabulka (příloha 3), kde je srovnávána použitelnost objektivů při různé rychlosti snímání a vzdálenosti zkoumaného objektu. Vzhledem k podmínkám na pracovišti a na základě předchozího porovnání objektivů, byl vybrán objektiv o ohniskové vzdálenosti 12 mm. Experiment probíhal dopoledne za umělého osvětlení na dílně a prostupujícího denního světla zvenčí, tudíž bylo nezbytně nutné použít další zdroje světla. Abychom docílili kontrastního osvětlení soustavy nástroj-obrobek bylo nutné použít bílého pozadí ve formě kladívkového papíru formátu A4. K osvětlení jsme použili halogenovou lampu o příkonu 250W. Kompletní schéma je zobrazeno na obr. 46 a 47. Videokameru jsme přes USB rozhraní propojili s notebookem a pomocí softwaru Fastec Imaging CamLink zaznamenávali proces utváření třísky při různých řezných podmínkách. Po každé změně řezných podmínek bylo nutné vyčkat na uložení záznamu. Jednotlivé druhy třísek byli sesbírány, rozděleny a následně nafoceny digitálním fotoaparátem Olympus Mju 400 a použity k sestavení diagramu závislosti utváření třísky na podmínkách  $a_p$  a  $f$ .

## 5.2 Vliv řezných podmínek na tvorbu třísky

### Vstupní parametry:

- doporučená řezná rychlost VBD  $v_c=200$  m/min

Ze vztahu pro výpočet řezné rychlosti při soustružení

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [m \cdot \min^{-1}], \quad (5.2)$$

odvodíme vztah pro výpočet otáček vřetene:

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} \quad [l \cdot \min^{-1}]. \quad (5.3)$$

Po dosazení:

$$n = \frac{1000 \cdot 200 \text{ m} \cdot \min^{-1}}{\pi \cdot 60 \text{ mm}} \cong 1060 \text{ min}^{-1}, \quad (5.4)$$

- hloubka odebírané vrstvy  $a_p < 0,5 \div 1,5 >$  mm
- velikost posuvu  $f < 0,1 \div 0,294 >$  mm





### 5.2.1 Vliv hloubky řezu $a_p$ a velikosti posuvu $f$

V kapitole 3.2 jsme se zabývali faktory, které ovlivňují utváření třísky. Největší vliv z těchto faktorů má hloubka řezu  $a_p$  a velikost posuvu  $f$ . Tyto dva parametry slouží k vytvoření funkčního diagramu utváření třísek. Na obr.32 a obr.33 je znázorněna závislost tvorby třísky na hloubce řezu a velikosti posuvu. Tyto závislosti jsou známy již několik desetiletí a součástí experimentu diplomové práce bylo, zaznamenat obdobný funkční diagram utváření třísek (obr. 54). V tab.7 jsou zobrazeny tvary třísek při různých řezných podmínkách. Z praxe víme, že posuv má významný vliv na tvorbu třísky. V případě neměnné hloubky řezu a zvětšování posuvu, dochází k tomu, že tříška se z plynulé táhlé mění na drobivou. Vzhledem k obráběnému materiálu a ke skutečnosti, že k obrábění byl použit kvalitní nástroj, vyplývá z experimentu následující:

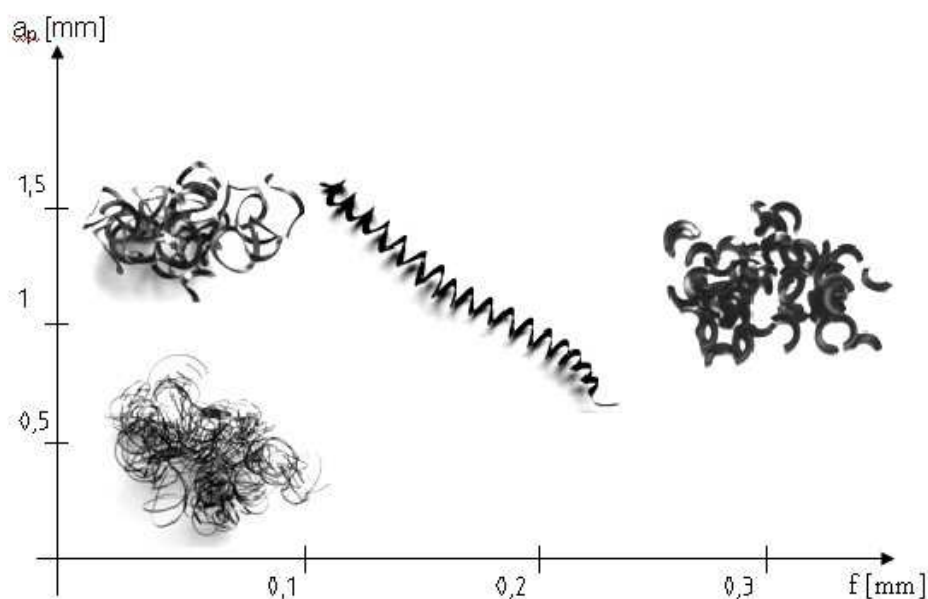
- nástroj byl schopný utvářet dlouhou táhlou třísku v rozsahu posuvu  $f < 0,1 \div 0,233 >$  a geometrie třísky byla v podstatě neměnná
- tříška drobivá začala vznikat až při hodnotě posuvu  $f=0,294$ mm

Patrný byl také vliv snížení otáček na hodnotu  $n=690 \text{ min}^{-1}$ . Při stejné hloubce  $a_p=1,5$  mm a velikosti posuvu  $f=0,2$  vznikala při snížených otáčkách tříška táhlá, ale vlivem zahřátí soustavy nástroj-obrobek začala v rámci několika sekund vznikat tříška drobivá.

Tab. 7 Vliv velikosti posuvu na utváření třísky při hloubce řezu  $a_p=1,5\text{mm}$ 

$f_1=0,1\text{mm}$	$f_2=0,155\text{mm}$
	
$f_3=0,233\text{mm}$	$f_4=0,294\text{mm}$
	

Z praktického hlediska je ruční sběr třísek a jejich rozdělení podle řezných podmínek značně nevhodný. Smyslem diplomové práce bylo, inspirovat se již po několik desetiletí známým diagramem a sběr třísek digitalizovat. Při nastavení doporučených řezných podmínek jsme u daného nástroje sledovali jak se utváří tříska a jaký typ třísky vzniká. Pokud tento postup budeme aplikovat na různé nástroje a jejich doporučené řezné podmínky, můžeme v budoucnosti využít digitalizace třísek pro sestavení diagramu závislosti utváření třísky na  $a_p$  a  $f$ . Digitalizace třísek by byla vhodná např. při vytváření nových katalogů a nebo k vytvoření elektronické databáze daných závislostí.



Obr. 53 Závislost tvorby třísky na hloubce řezu a velikosti posuvu



### 5.2.2 Vliv geometrie nástroje

Na obr. 34 a obr. 51 jsou zobrazeny geometrické parametry utvářeče třísky na nástroji.

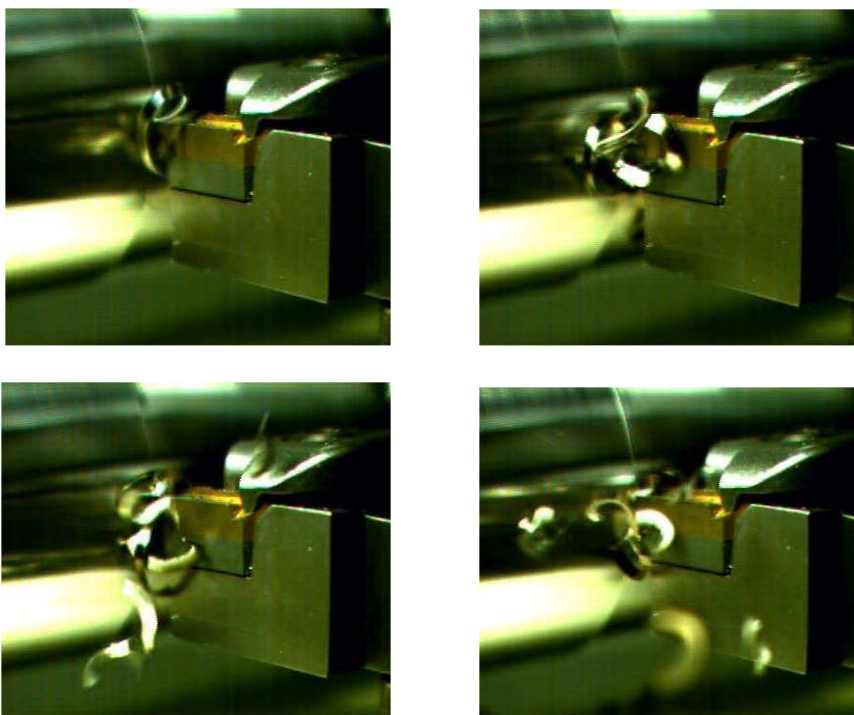
- velikost fazetky  $x=1,2$  mm
- vzdálenost výstupní hrany žlábků od ostří  $b'=3,07$  mm
- úhel čela  $12^\circ$

Z obr.33-b) a z podmínky  $x < a_p$  je patrné, že tříska bude utvářena pomocí utvářeči na nástroji a bude zakřivena pod určitým poloměrem  $R$ , což se potvrdilo i při experimentu (obr. 54).



Obr. 54 Utváření třísky na čele nástroje

Na směr odchodu třísky má podstatný vliv nástrojový úhel sklonu hlavního ostří  $\lambda_s$ . Velikost úhlu je  $\lambda_s=+1^\circ$ , což znamená že tříska odchází směrem od obrobku a dále se láme na hřbetu nástroje. Následující obrázek 56 zachycuje sekvenci snímků při hloubce řezu  $a_p=1,5$  mm a  $f=0,294$  mm. Nejprve se tvoří tříska táhlá, vlivem zahřátí soustavy se začne tvořit tříska dělená.



Obr. 56 Vliv zahřátí soustavy na tvorbu třísky

### 5.3 Další způsoby řešení osvětlení

Při použití současných kamer snímajících s vysokými frekvencemi, řádově v desítkách tisíc obrázků za sekundu, je nutné použití velmi výkonného osvětlení scény. Používají se halogenová nebo výbojková svítidla o příkonu několika stovek wattů až kilowattů.

Pro nás je směrodatná skutečnost, že kamera použitá k experimentu je schopna zaznamenávat s maximální snímkovací frekvencí 1000 fps, a proto postačí k osvětlení halogenová svítidla. Pro představu, výbojková svítidla ve formě série synchronizovaných výbojkových blesků by se jevíly jako perspektivní např. pro balistické aplikace, kde se snímací frekvence pohybuje v řádech desítek tisíců obrázků za sekundu.

K zajištění dobré rozlišitelnosti kritického detailu je třeba vytvořit dostatečný kontrast jasu mezi detailem a bezprostředním okolím. Rovněž jakost podání barev, chromatičnost světla a kolorita povrchů ovlivňují záznam snímaného objektu. Důležitými vlastnostmi osvětlení jsou:

- směrovost
- stínivost

Směrovost je určena světelným vektorem a s ohledem na geometrické a fotometrické parametry pozorovaných předmětů je nutné směrovost světla řešit individuálně. Většinou se směr osvětlení volí tak, aby světlo do místa úkolu dopadalo převážně zleva a shora.

Stínivost je schopnost osvětlení vytvářet na předmětech stíny. Rozvržení stínů je velmi důležitým činitelem prostorové rozlišitelnosti detailů a přednost dáváme zejména stínům měkkým. Z toho hlediska jsou výhodné velkoplošné zdroje a světelné zdroje rozdělené do prostoru. Pouhé místní osvětlení se světlem usměrněným na malou pracovní plochu je nevhodné a proto musí se doplnit rozptýleným celkovým osvětlením.

Kapitola 1.6 popisuje stanovení vhodné geometrie osvětlení a výběr vhodného typu osvětlovače. Chceme dosáhnout maximálního kontrastu těch částí které nás zajímají, tzn. hrany ostří VBD, respektive části VBD která ubírá materiál. Toho docílíme např. metodou přímého osvětlení a použitím bílého pozadí (obr. 57), stejnou jakou jsme použili při experimentu.



Obr. 57 Přímé osvětlení s použitím bílého pozadí (fps=250)

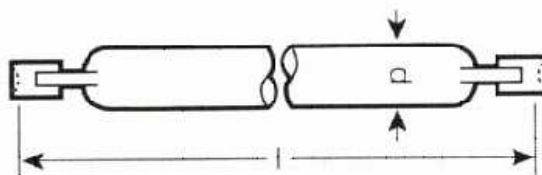


Abychom byli schopni snímat utváření třísky vyšší záznamovou rychlostí než 250 snímků za sekundu, je nutné použít dalších osvětlovacích prostředků. Budeme vycházet z předpokladu použití bílého pozadí, které eliminuje rušivé vlivy (lože podélného suportu aj.). Pomocí několika halogenových osvětlovačů pak odstíníme nežádoucí zdroje světla (umělé osvětlení). Halogenové osvětlovače mají velký příkon (až 2000W) a vysoký náběhový proud, proto je zapínáme jen během záznamu. Jejich povrchová teplota dosahuje cca 600°C. Patří mezi teplotní zdroje světla, tzn. že se zde látka zahřívá na vysokou teplotu a tím vzniká světlo. Světelný tok je udáván v lumenech (vedlejší jednotka soustavy SI) a u lampy s příkonem 2000W dosahuje hodnoty 44 000 lm.

Pro srovnání, obyčejná žárovka s příkonem 60W, která se používá např. k osvětlení nad psacím stolem, má světelný tok 716 lm.

### Návrh aplikace halogenových žárovek

Firma OSRAM nabízí sortiment všech druhů osvětlovacích prostředků. Širokou škálu zaujímají i halogenové žárovky. K osvětlení jsem vybral halogenové lineární žárovky typu OSRAM/UV-STOP, 230V o příkonech 500, 1000, 1500 a 2000 W. Střední doba života světelného zdroje je 2000 hodin.



Obr. 58 Halogenová lineární zářivka typu OSRAM/UV-STOP

Tab. 8 Žárovky halogenové lineární

Typ	Napětí [V]	Příkon [W]	Světelný tok [lm]	Patice	Délka [mm]
OSRAM 250	230	250	3400	R7s	76,8
OSRAM 500	230	500	9 500	R7s	114,2
OSRAM 1000	230	1000	22 000	R7s	185,7
OSRAM 1500	230	1500	33 000	R7s	250,7
OSRAM 2000	230	2000	44 000	R7s	334,4

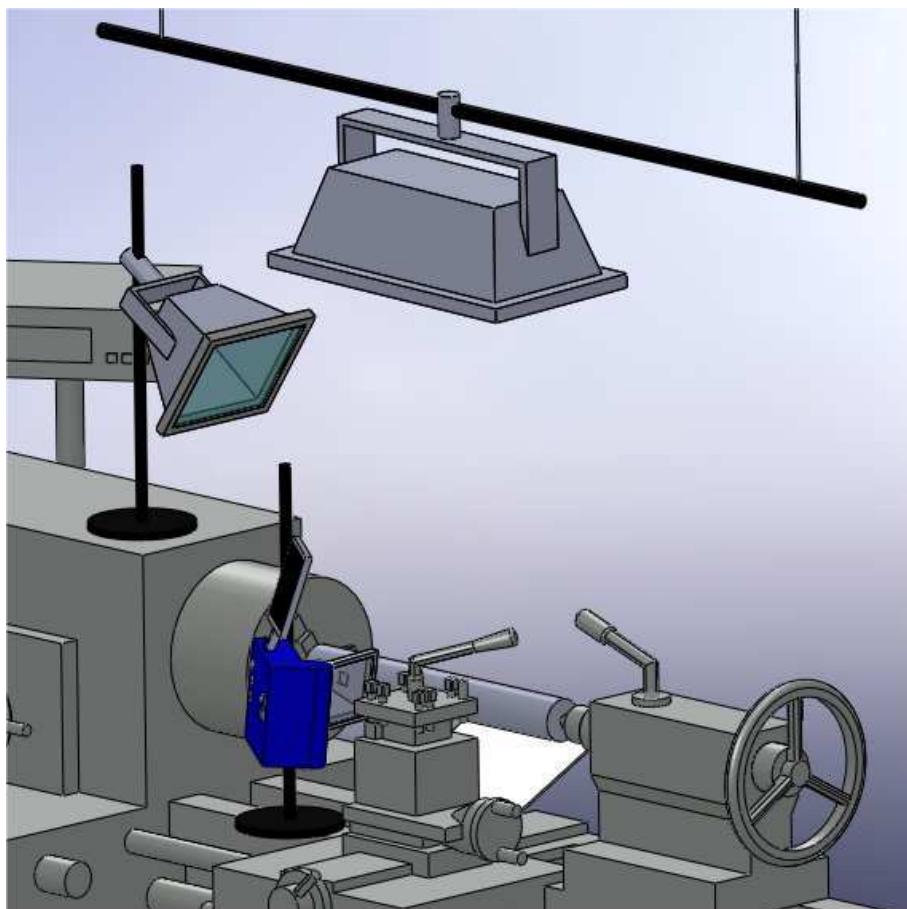
Řešení osvětlení spočívá v následujících krocích:

- počet zvolených osvětlovačů
- příkon zvolených osvětlovačů
- nastavení vzdálenosti a směru osvětlovačů
- možnost manipulace s osvětlovačem v pracovním prostoru stroje



Obr. 59 Halogenový reflektor s příkonem 500W

Metoda přímého osvětlení, která byla použita při experimentu, je výchozím stanoviskem pro doplnění dalších světelných zdrojů. Tato metoda se jevila jako nejlepší řešení dané situace a zvětšením intenzity osvětlení dosáhneme toho, že budeme moci využít i rychlosti nahrávání 1000 snímků za sekundu a tím dosáhneme podstatně lepších výsledků záznamu. Obr. 60 představuje řešení problému.



Obr. 60 Návrh na řešení osvětlení

Použité osvětlovače:

- halogenová lampa o příkonu 250W
- halogenová lampa o příkonu 500W
- halogenová lampa o příkonu 1500W
- bílé pozadí

Osvětlení je vhodné pro záznam utváření třísky na hřbetu nástroje a pro zachycení tvaru třísky při oddělování.

#### **Ostatní návrhy osvětlení:**

Použité osvětlovače:

- halogenová lampa o příkonu 250W
- halogenová lampa o příkonu 500W
- bílé pozadí

Metoda osvětlení vhodná pro snímání čela nástroje a záznam utváření třísky na čele nástroje.

- schéma osvětlení viz. příloha 4

Použité osvětlovače:

- 2-krát halogenová lampa o příkonu 1500W
- bílé pozadí

Metoda výrazného plošného osvětlení, eliminuje výskyt stínů.

- schéma osvětlení viz. příloha 5

#### **Hospodárnost osvětlení**

Obecně platí, že osvětlovací soustavy se snažíme navrhnout tak, aby umožňovaly dosáhnout při co nejsnazší, přesné a bezpečné práci co nejlepších pracovních výsledků při poměrně nízké spotřebě energie.

Důležitou okolností ovlivňující hospodárnost osvětlovací soustavy je správná volba zdrojů a svítidel a využívání moderních efektivních světelných zdrojů. S návrhem, realizací a provozem osvětlovací soustavy souvisí plnění nejen světelně technických požadavků, ale také konstrukčních, estetických, energetických a ekonomických.

## ZÁVĚR

Diplomová práce je zaměřena na možnosti využití vysokorychlostní digitální kamery při procesu třískového obrábění a zabývá se analýzou tvorby třísky při podélném soustružení za různých řezných podmínek. Dále se práce zabývá vhodnou volbou objektivu, rychlostí snímání a s tím související problematikou osvětlení. Z experimentu plyne následující:

- Vzhledem k nedostatečné osvětlovací technice nebylo možné při analýze utváření třísky plně využít maximálního rozsahu snímkovací frekvence vysokorychlostní kamery TroubleShooter, a sice 1000 snímků za sekundu;
- Základem, z hlediska osvětlení experimentu, bylo použití bílého pozadí tvořeného kladívkovým papírem;
- Při použití halogenové lampy o příkonu 250W byla kamera schopna snímat maximálně 250 snímků za sekundu;
- Podrobná analýza záznamu utváření třísky zdokumentovala vliv změny řezných podmínek a vliv utvářeče. Z odebraných digitalizovaných třísek byl sestaven diagram závislosti utváření třísky na změně velikosti posuvu  $f$  a hloubky řezu  $a_p$ . Digitalizaci třísek můžeme aplikovat na různé nástroje při různých řezných podmínkách a vytvářet tak např. nové katalogy či elektronické databáze daných závislostí;
- Výběr objektivu byl závislý na pracovním prostoru stroje, respektive na vzdálenosti ze které je možné snímat objekt. Minimální vzdálenost kamery od snímaného objektu byla cca 10 cm a to i bez použití krytky v podobě čírého skla;
- Pokud chceme využít maximální snímkovací frekvence kamery je nutné použití dalších osvětlovacích prostředků a jejich vhodného nasměrování, např. halogenových žárovek o příkonu 500 ÷ 2000 W.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. (Přel. z: Modern Metal Sutting - A Practical Handbook. Překlad M. Kudela.), 1. vyd., Praha, Scientia, s.r.o., 1997., ISBN 91-97 22 99-4-6.
2. DLOUHÝ, M., HOUDEK, J., KOLOC J. – Slinuté karbidy pro obrábění. Státní nakladatelství technické literatury, 1964. Vytiskl TISK, knižní výroba Brno, L13-B1-IV-31/22031/IX, vydání první, 1700 výtisků.
3. Pecina, J., Pecina, P. – Materiály a technologie – dřevo, Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity – Katedra technické a informační výchovy, 2007
4. SVOBODA, Š. Digitální vysokorychlostní kamery pomáhají řešit problémy chodu strojů a výrobních linek [cit. srpen 2004], dostupné z: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=32518](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=32518)>
5. About Highspeed Digital Video Cameras, [online], dostupné z www: <[http://www.fastecimaging.com/about\\_hs.html](http://www.fastecimaging.com/about_hs.html)>
6. Glossary of terms, <<http://www.fastecimaging.com>> [cit. 2009-01-15], dostupné z www: <<http://www.fastecimaging.com/glossary.html>>
7. DŽIK, P. Co to je a jak se chová infračervené záření. Paladix foto-on-line. [online]. [cit. 2003-01-06]. Dostupné z: <<http://paladix.cz/clanky/co-to-je-a-jak-se-chova-infracervene-zareni.html>>
8. Uehara, K., Takeshita, H. – Cutting ceramics with technique of hot machining. Annals of the CIRP, vol. 35/1, s.55-58
9. Ullmann, E., Zeitter, R. – Finite Element Modeling and cutting Simulation Of Inconel 718, Institute for Machine Tools and Factory Management (IWF), Annals of the CIRP 1/2007
10. Zhen-Bin, H., Komanduri, R., 1995, On a Thermomechanical Model of Shear Instability in Machining, Annals of the CIRP, 44/1:69-72
11. How much money can a highspeed fastec camera save you? [online], dostupné z www: <<http://www.fastecimaging.com/calc.html>>
12. Henkel, M. – Trískové obrábění technických dílů z plastu, [www.mmspektrum.cz](http://www.mmspektrum.cz) [online], [2005/1, str.56], dostupné z www: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/triskove-obrabeni-technicky-dilu-z-plastu>>
13. HUMÁR, A., Přednášky z předmětu Experimentální metody, Název přednášky – Metody měření řezných sil [cit. 2007-08-10]
14. FOREJT, M. – Morfologie vad a opotřebení povlakovaných řezných nástrojů (Diplomová práce), VUT v Brně, FSI, 2008
15. Hoadley Bruce, R. – Understanding wood, kapitola Machining and banding wood [online], dostupné z www: <<http://books.google.cz>>
16. BUMBÁLEK, B. - Fyzikální podstata řezání – Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT v Brně, FSI [online], 2005, dostupné z www:<[http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/Opora05\\_Fyzikalni\\_podstata\\_rezani.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/Opora05_Fyzikalni_podstata_rezani.pdf)>
17. CHLADIL, J. – Přednášky z předmětu Teorie obrábění, ak.rok 2006/2007
18. PÍŠKA, M., FOREJT, M. – Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM 2006, ISBN 80-214-2374-9.

19. KOČMAN, K., PROKOP, J. – Technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM.2001, ISBN 80-214-1996-2.
20. PŘYKRYL, Z., MUSÍLKOVÁ, R. – Teorie obrábění 3. Praha: SNTL/ALFA. 1982
21. HUMÁR, A. – Technologie I: Technologie obrábění – 1.část. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT v Brně, [online] 2005, dostupné z [www: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/TI\\_TO-1cast.pdf>](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/TI_TO-1cast.pdf)
22. PRAMET TOOLS, s.r.o – Turning 2009 [online], dostupné z [www: <http://www.pramet.com/download/katalog/pdf/Turning%202009%20CZSK%20screen.pdf>](http://www.pramet.com/download/katalog/pdf/Turning%202009%20CZSK%20screen.pdf)
23. PRAMET TOOLS, s.r.o – Příručka obrábění 2004 [online], dostupné z [www: <http://www.pramet.com/download/katalog/pdf/prirucka\\_cz.pdf>](http://www.pramet.com/download/katalog/pdf/prirucka_cz.pdf)
24. Havle, O. – Strojové vidění IV: Osvětlovače [www.odbornecasopisy.cz](http://www.odbornecasopisy.cz) [online], [cit. duben 2008] dostupné z [www: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=36988>](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36988)
25. FOREJT, M., HUMÁR, A., PÍŠKA, M. JANÍČEK, L. – Experimentální metody. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT v Brně [online], dostupné z [www: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory\\_soubory/experimentalni\\_metody\\_cviceni\\_forejt\\_piska\\_humar\\_janicek.pdf>](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/experimentalni_metody_cviceni_forejt_piska_humar_janicek.pdf)
26. OLYMPUS Corporation – i-SPEED 3 – Produkty pro pořizování vysokorychlostních záznamů [online], 2009, dostupné z [www: <http://www.olympus-ims.com/cs/ispeed-3>](http://www.olympus-ims.com/cs/ispeed-3)

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ:**

Zkratka Symbol	Jednotka	Popis
$\alpha$	[°]	úhel hřbetu
$\beta$	[°]	úhel břitu
$\chi$	[°]	úhel čela
$\delta$	[°]	úhel řezu
$\varepsilon$	[°]	úhel špičky
$\lambda_s$	[°]	úhel sklonu ostří
$\lambda$	[nm]	vlnová délka
$\kappa$	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
$\kappa_r$	[°]	úhel nastavení vedlejšího ostří
$\tau_s$	[MPa]	smykové napětí ve střižné rovině
$a$	[mm]	tloušťka třísky
$A_D$	[mm <sup>2</sup> ]	jmenovitá plocha řezu
$A_{Dc}$	[mm <sup>2</sup> ]	jmenovitá plocha průřezu třísky
$a_p$	[mm]	hloubka řezu
$A_{sh}$	[mm <sup>2</sup> ]	absolutní velikost průřezu třísky
$A_{\alpha,\alpha'}$	[-]	hřbet VBD
$A_Y$	[-]	čelo VBD
$b$	[mm]	šířka třísky
$b'$	[mm]	vzdálenost výstupní hrany žlábků od ostří
$b''$	[mm]	šířka nožového držáku
$b_D$	[mm]	jmenovitá šířka řezu
$b_{Dc}$	[mm]	šířka třísky
$C_{Fc}$	[-]	konstanta pro výpočet složky řezné síly
$C_{Ff}$	[-]	konstanta pro výpočet složky řezné síly
$C_{Fp}$	[-]	konstanta pro výpočet složky řezné síly
$D$	[mm]	průměr plochy obrobku při soustružení
$d$	[mm]	šířka VBD
$E_D$	[-]	minimální deformační práce
$f$	[mm]	posuv
$F$	[N]	síla mezi čelem a třískou
$F_c$	[N]	řezná síla
$F_f$	[N]	posuvová síla
$F_N$	[N]	normálová síla na čele nástroje
$f_o$	[mm]	ohnisková vzdálenost objektivu
$F_p$	[N]	pasivní síla
$F_p$	[N]	vertikální řezná složka
fps	[snímků/s]	počet snímků za sekundu (frame per second)
$F_{SN}$	[N]	normálová síla v rovině max. smykových napětí
$F_{ST}$	[N]	tečná síla v rovině max. smykových napětí
$F_T$	[N]	tečná síla na čele nástroje
$F_{\Phi n}$	[N]	normálová síla v rovině max. smykových napětí
$F_{\Phi t}$	[N]	tečná síla v rovině max. smykových napětí

$h$	[mm]	hloubka utvářeče na čele VBD
$h_1$	[mm]	tloušťka odřezávaného materiálu
$h_1=h$	[mm]	výška nožového držáku
$h_2$	[mm]	tloušťka tvářené třísky
$h_D$	[mm]	jmenovitá tloušťka řezu
$h_{Dc}$	[mm]	tloušťka třísky
$k_h$	[-]	součinitel přechování třísky
$k_{Vo}$	[-]	objemový součinitel třísek
$L$	[mm]	relativní dráha nástroje vzhledem k obrobku
$l_0$	[mm]	délka odřezávané vrstvy
$l_1$	[mm]	délka třísky
$l_1$	[mm]	délka nožového držáku (včetně VBD)
$L_C$	[mm]	korespondující délka třísky
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	počet otáček za minutu
$P_f$	[-]	nástrojová boční rovina
$P_o$	[-]	nástrojová ortogonální rovina
$P_p$	[-]	nástrojová zadní rovina
$P_r$	[-]	nástrojová základní rovina
$P_s$	[-]	nástrojová rovina ostří
$R$	[N]	odporová síla v rovině max. smykových napětí
$R$	[mm]	zakřivení utvářené třísky
$S_{hv}$	[mm]	rozměr senzoru, horizontální/vertikální
$s$	[mm]	tloušťka VBD
$S'$	[-]	hlavní ostří VBD
$S'$	[-]	vedlejší ostří VBD
$SP$	[-]	rovina stříhu
$VBD$	[-]	vyměnitelná břitová destička
$v_c$	[m.min <sup>-1</sup> ]	řezná rychlost
$V_{ch}$	[mm <sup>3</sup> ]	objem třísky
$V_m$	[mm <sup>3</sup> ]	objem odebíraného materiálu
$v_s$	[m.min <sup>-1</sup> ]	rychlost třísky v rovině max. smykových napětí
$v_t$	[m.min <sup>-1</sup> ]	rychlost třísky
$x$	[mm]	velikost fazetky VBD
$x_{Fc}, x_{Fp}, x_{Ff}$	[-]	exponenty pro výpočet složky řezné síly
$y_{Fc}, y_{Fp}, y_{Ff}$	[-]	exponenty pro výpočet složky řezné síly
$Z$	[°]	zorný úhel
$\Delta s$	[m]	vzd. po které se pohybuje materiál
$\Delta t$	[s]	čas během pohybu materiálu po dráze $\Delta s$
$\Delta y$	[mm]	tloušťka lamely smykového pásma
$\varepsilon$	[-]	smyková deformace ve střížné rovině
$\Phi$	[°]	úhel roviny stříhu
$\Phi_{st}$	[lm]	světelný tok



**SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1	Technické parametry vysokorychlostní kamery
Příloha 2	Rozměry videokamery - orientační
Příloha 3	Rozdělení objektivů pro různé snímkové frekvence a vzdálenost snímání
Příloha 4	Návrh rozmístění osvětlovačů 250W, 500W
Příloha 5	Návrh rozmístění osvětlovačů 2 x 1500W

## Příloha 1      Technické parametry vysokorychlostní kamery

<b>MODEL:</b>	TroubleShooter 1000
<b>DETEKTOR:</b>	Rozlišení 640x480 CMOS maticový detektor, barevný (24-bitové rozlišení)
<b>RYCHLOST ZÁVĚRKY:</b>	1x, 2x, 3x, 4x, 5x, 10x a 20x záznamové rychlosti
<b>REŽIM ZÁZNAMU:</b>	<p>Ruční Záznam začne po stisknutí spouště. Pokračuje v záznamu do opětovného stisknutí spouště.</p> <p>Trigger Záznam začne po stisknutí spouště. Pokračuje v záznamu snímků do doby, než je aktivován externí trigger. Pozice nastavitelného triggeru stanoví, kolik snímků má být uloženo před a po triggeru.</p>
<b>RYCHLOST PŘEHRÁVÁNÍ:</b>	Po jednotlivých snímcích, nebo rychlostí 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 25, 30, 50, 60, 125, 250, 500 a 1000 snímků za sekundu, dopředu a nazpět.
<b>VIDEO MONITOR:</b>	Vestavěny, 5“ LCD barevný monitor.
<b>OVLÁDACÍ FUNKCE:</b>	Nastavení, Výběr, Záznam, Stop, Přehrávání, Dopředu, Zpět, Download, Zapnutí/Vypnutí
<b>VSTUPY/VÝSTUPY:</b>	USB-2 port, Compact flash, IR, Trigger, Pulse In, Pulse Out, DC napájení
<b>EXTERNÍ TRIGGER:</b>	Sepnutí kontaktu nebo standardní TTL signál, do 30 V DC
<b>SYNCHRONIZACE:</b>	Více TroubleShooter kamer je možno synchronizovat pomocí funkce phase-lock
<b>SOFTWARE:</b>	Zahrnuje software CamLink pro záznam, přehrávání a stažení do PC. Snímky jsou přetaženy a uloženy ve formátu .avi. Rovněž obsahuje MotionMeasure software pro rozbor a rychlý a jednoduchý výpočet hodnot jako jsou zrychlení a rychlost.
<b>OBJEKTIVY:</b>	Standardní C-upevnění.

**NAPÁJENÍ:**

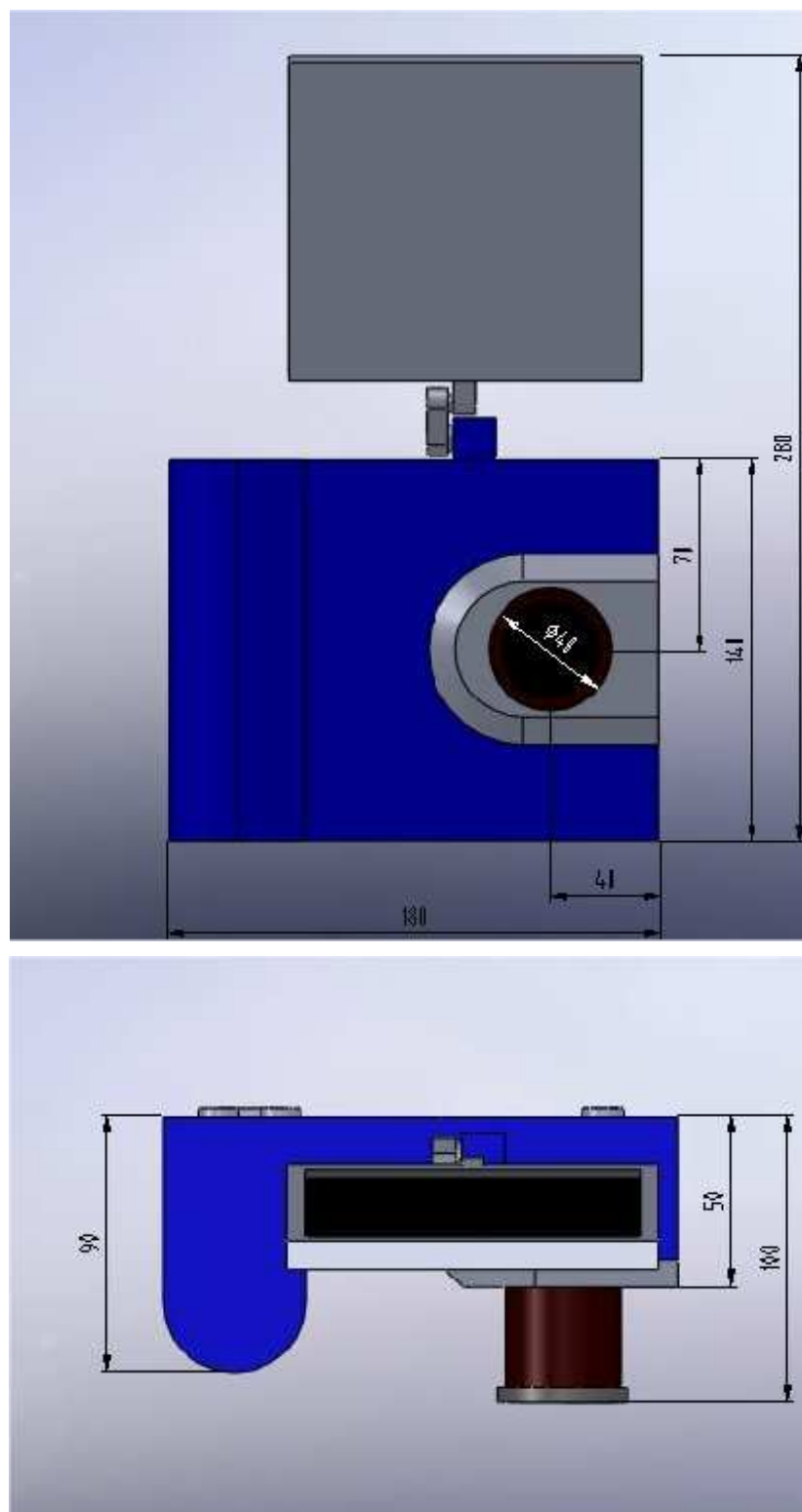
4 D monočlánky nebo 110/220 V AC adaptér

**ROZMĚRY:**







180 x 140 x 90, 1,2kg.







Snímků za sekundu Záznamová rychlost	Standardní paměť 2,138 snímků	Rozšířená paměť 4,368 snímků
50 (PAL)	43,7 sekund	87,4 sekund
60 (NTSC)	36,4 sekund	72,8 sekund
125	17,4 sekund	34,8 sekund
250	8,7 sekund	17,4 sekund
500	4,4 sekund	8,8 sekund
1000	2,2 sekund	4,4 sekund







## Příloha 2      Rozměry videokamery - orientační



Příloha 3      Rozdělení objektivů pro různé snímkovací frekvence a vzdálenost snímání

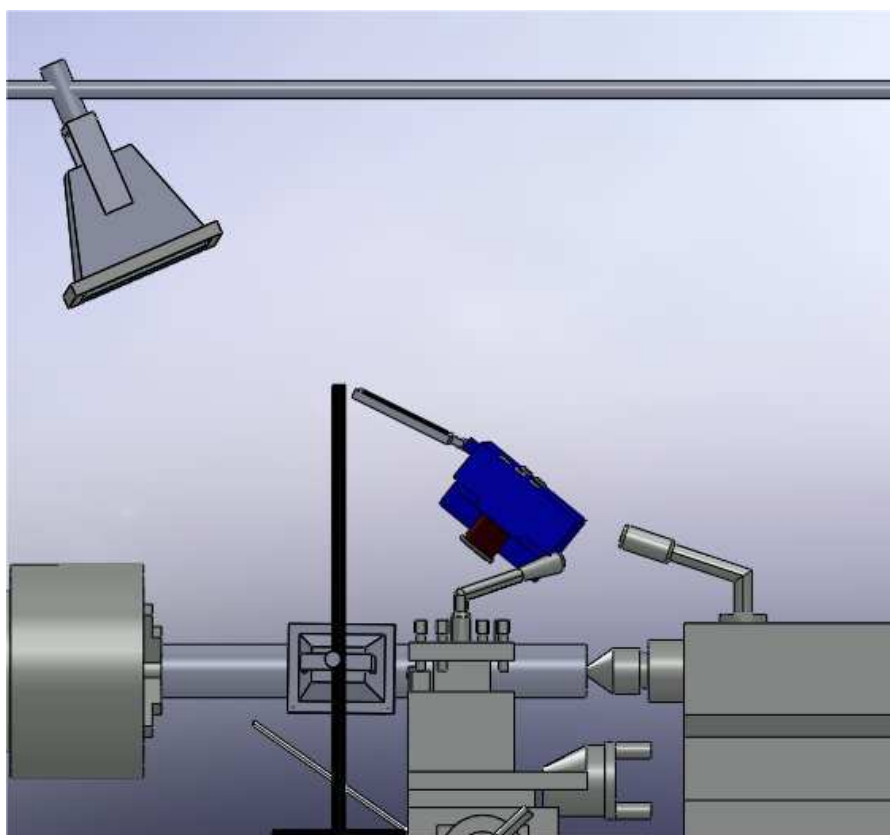
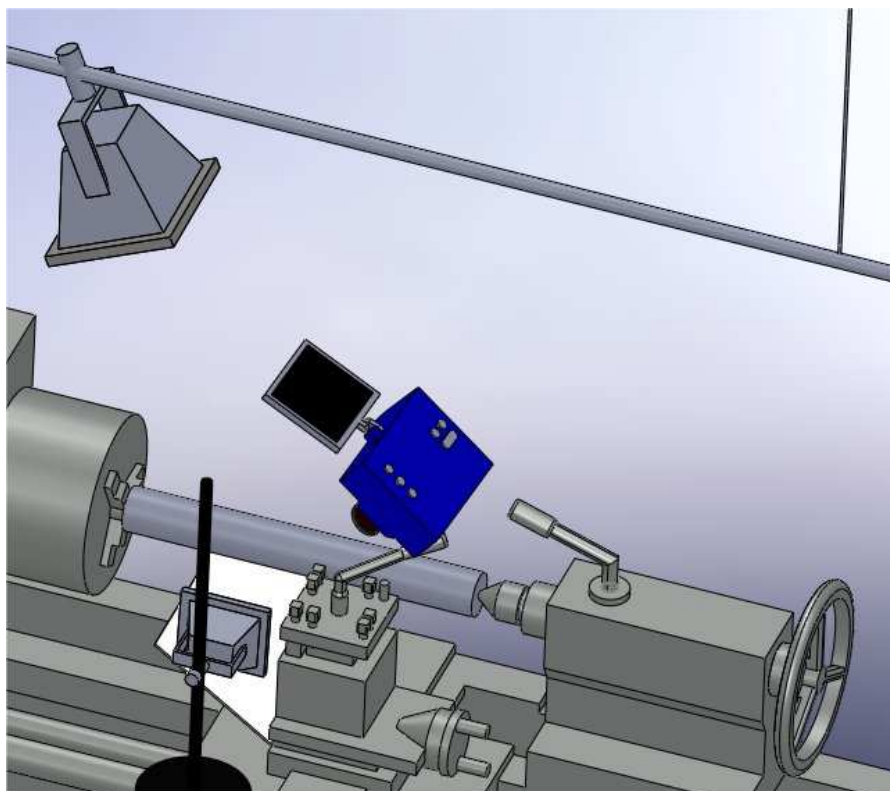
Ohnisková vzdálenost objektivu [mm]	Počet snímků za sekundu	Vzdálenost měřeného objektu [cm]	
		10	20
3,6	250		
	500		
	1000		

6	250		
	500		
	1000		

12	250		
	500		
12	1000		

Pozn.: Clona objektivu byla plně spuštěná.

Příloha 4      Návrh rozmístění osvětlovačů 250W, 500W





## Příloha 5      Návrh rozmístění osvětlovačů 2x1500W

